



**Aalto-yliopisto**  
Insinöörیتieteiden  
korkeakoulu

Matias Ranta-Korpi

## **Aurinko- ja ilmalämmön hyödyntäminen maalämpöjärjestelmän energiatehokkuuden parantamisessa**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi  
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 29.07.2018

Valvoja: Professori Markku Virtanen

Ohjaaja: Tekniikan tohtori Simo Nurmi

---

**Tekijä** Matias Ranta-Korpi

---

**Työn nimi** Aurinko- ja ilmalämmön hyödyntäminen maalämpöjärjestelmän energiatehokkuuden parantamisessa

---

**Maisteriohjelma** Energy Technology

**Koodi** ENG21

---

**Työn valvoja** Professori Markku Virtanen

---

**Työn ohjaaja(t)** Tekniikan tohtori Simo Nurmi

---

**Päivämäärä** 29.07.2018

**Sivumäärä** 82+7

**Kieli** Suomi

---

### Tiivistelmä

Maalämpöjärjestelmän energiakaivot jäähtyvät vuosien saatossa, kun niistä otetaan enemmän lämpöenergiaa kuin niihin ladataan. Tämä johtaa maalämpöpumpun hyötysuhteen heikkenemiseen, joka lisää järjestelmän sähkön kulutusta. Maalämpöjärjestelmä voidaan varustaa lisälämmönlähteellä, kuten ilma- tai aurinkolämmöllä, joilla voidaan ladata lämpöenergiaa kallioperään energiakaivojen kautta, eli regeneroida energiakaivoja. Regeneroinnin avulla estetään tai hidastetaan energiakaivojen jäähtymistä, ja maalämpöjärjestelmä toimii taloudellisemmin ja luotettavammin vuosienkin kuluksua.

Työn teoriaosuudessa käsiteltiin maalämpöjärjestelmän lämmönlähdettä, eli maankamaraa lämmönlähteenä, maankamaran regenerointia sekä tässä työssä regenerointilähteenä käytettyjä aurinko- ja ilmalämpöjärjestelmiä.

Tutkimuksen tavoitteena oli tarkastella kahden tutkimuskohteen, Varsinais-Suomessa sijaitsevan toimistorakennuksen ja Kanta-Hämeessä sijaitsevan asuinkerrostalon kautta ilma- ja aurinkolämmön taloudellista kannattavuutta maalämpöjärjestelmän energiatehokkuuden parantamisessa. Lisäksi tutkimuksen tavoitteena oli tarkastella lisälämmönlähteen kytkennän vaikutusta maalämpöjärjestelmän energiatehokkuuteen. Ensimmäisessä kytkennässä lisälämpö johdettiin energiakaivokenttään ja toisessa maalämpöpumpun höyrystimelle menevään lämmönsiirtonesteeseen. Tarkastelu suoritettiin erikokoisilla lisälämmönlähdējärjestelmillä. Tarkasteluajanjaksona oli 15 vuotta, ja tarkastelu suoritettiin tuntitasolla hyödyntäen *TRY2012 Energialaskennan testivuodet nykyilmastossa* tuntiaineistoa. Energiakaivokentän toimintaa simuloitiin kaupallisella ohjelmistolla Earth Energy Designer, ja rakennuksen sekä ilma- ja aurinkolämpöjärjestelmän toimintaa työssä kehitetyllä MS Excel -sovelluksella.

Tutkimustuloksena saatiin, että ulkoilman hyödyntäminen maalämpöjärjestelmän lisälämmönlähteenä on taloudellisesti kannattavampaa kuin aurinkolämmön. Ilmalämpöjärjestelmien käyttökustannukset eivät juurikaan eronneet aurinkolämpöjärjestelmien, mutta niiden investointikustannukset olivat merkittävästi pienemmät kuin aurinkolämpöjärjestelmien. Tarkasteltujen kytkentävaihtoehtojen välillä ei ollut merkittävää eroa, mutta johtamalla lisälämpö maalämpöpumpun höyrystimelle menevään lämmönsiirtonesteeseen saavutettiin hieman parempi maalämpöpumpun hyötysuhde.

---

**Avainsanat** Maalämpö, aurinkolämpö, ilmalämpö, energiakaivo, energiakaivokenttä, regenerointi, maalämpöjärjestelmän energiatehokkuus, elinkaarikustannukset

---

---

**Author** Matias Ranta-Korpi

---

**Title of thesis** Utilising solar and air source heat in the improvement of the energy efficiency of ground source heat pump systems

---

**Master programme** Energy Technology

**Code** ENG21

---

**Thesis supervisor** Professor Markku Virtanen

---

**Thesis advisor(s)** Simo Nurmi, D. Sc. (Tech.)

---

**Date** 29.07.2018

**Number of pages** 82+7

**Language** Finnish

---

### Abstract

The boreholes of ground source heat pump (GSHP) systems will cool down over the years when more thermal energy is extracted than is injected into them. This leads to the decline of the efficiency rate of GSHP which increases the system electricity consumption. The GSHP system can be equipped with an extra heat source, such air source heat or solar heat which can be used to charge thermal energy into the bedrock through the boreholes, in other words to regenerate the boreholes. The cooling of boreholes is prevented or slowed down by the regeneration and the GSHP system will operate more economically and more reliably even after years of use.

The theory part of the work examined the bedrock as the GSHP heat source, regeneration of the bedrock and regeneration sources used in this work, solar and air source heat systems.

The aim of this study was to examine air source and solar heat profitability in improving GSHP system energy efficiency through two research subjects, an office building and a multi-storey apartment building. The office building is located in the province of Varsinais-Suomi and the apartment building in the province of Kanta-Häme. In addition, the aim of this study was to examine the influence of the extra heat source connection options on the GSHP energy efficiency. In the first connection type, the extra heat was lead into the borehole field and in the second connection type into the brine which is entering the GSHP's evaporator. The examination was performed with different sizes of extra heat sources. The examination period was 15 years, time step was one hour and hourly data from *TRY2012* material was utilized in the calculations. Operation of borehole fields was simulated by commercial Earth Energy Designer software whereas buildings, air source heat and solar heat systems operation were simulated through in this study developed MS Excel application.

As the main result of the study, the utilising of ambient air as an extra heat source of GSHP system was found to be more profitable than solar heat. There is no significant difference in operation costs between air source heat and solar heat systems, but investment costs of air source heat systems were significantly lower than those of solar heat systems. There was no significant difference between examined connection options but a slightly higher GSHP efficiency rate was reached when extra thermal heat was lead into brine which is entering the GSHP's evaporator.

---

**Keywords** Ground heat, solar heat, air heat, borehole, borehole field, regeneration, energy efficiency of ground source heat pump (GSHP), Life Cycle Cost (LCC)

---

## **Alkusanat**

Tämä diplomityö on tehty LeaseGreen Suomi Oy:lle, ja työssä on tarkasteltu maalämpöjärjestelmän energiatehokkuuden parantamista lisälämmönlähteillä. Haluan kiittää LeaseGreenin henkilöstöä ja erityisesti ohjaajaani Simo Nurmea saamastani tuesta ja avusta työn tekemisessä. Lisäksi suuri kiitos kuuluu työni valvojalle Markku Virtaselle, jonka avulla sain työni viimeisteltyä.

Lopuksi haluan kiittää puolisoani Karoliinaa tuesta ja kannustamisesta opintojeni loppuun saattamisessa sekä perhettä ja ystäviä saamastani tuesta opintojeni aikana.

Espoo 29.7.2018

Matias Ranta-Korpi

# Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Alkusanat

Sisällysluettelo

Merkinnät

Lyhenteet

1	Johdanto .....	1
1.1	Tutkimuksen tausta .....	1
1.2	Tutkittava ongelma ja työn tavoitteet .....	1
1.3	Tutkimuksen rajaukset .....	2
2	Rakennusten lämmöntarve ja maankamara lämpöpumpun lämmönlähteenä .....	3
2.1	Rakennusten lämmitystarveprofiili Suomessa .....	3
2.2	Maa- ja kallioperä lämmönlähteenä .....	6
2.2.1	Maa- ja kallioperän lämpötila .....	6
2.2.2	Maa- ja kallioperän lämmöntuottoon vaikuttavat tekijät .....	9
2.3	Keruunesteen lämpötilan vaikutus maalämpöpumpun hyötysuhteeseen .....	11
3	Energiakaivojen regenerointi .....	14
3.1	Regeneroinnin tarve .....	14
3.1.1	Nettolämpötase .....	14
3.1.2	Kaivokentän muodon vaikutus .....	15
3.2	Energiakaivojen regeneroiminen .....	16
3.3	Regeneroinnin hyödyt .....	18
4	Lisäenergialähteiden kuvaus .....	20
4.1	Aurinkolämpö .....	20
4.1.1	Auringon säteily Suomessa .....	20
4.1.2	Aurinkokeräimet – taso- ja tyhjiöputkikeräin .....	21
4.1.3	Aurinkokeräinten tehokkuuteen vaikuttavat tekijät .....	24
4.1.4	Aurinkolämpöjärjestelmä lisäenergialähteenä maalämpöjärjestelmän rinnalla .....	26
4.2	Ilmalämpö .....	28
4.2.1	Ulkoilman lämpötilan pysyvyysarvot ja testivuoden lämpötilat Suomessa .....	28
4.2.2	Ilma-neste-lämmönvaihtimen teho .....	29
4.2.3	Ilma-neste-lämmönvaihtimen kytkentä maalämpöjärjestelmän rinnalle .....	30
5	Laskentamenetelmä .....	32
5.1	Laskentatyökalut .....	32
5.2	Laskentaparametrit .....	32
5.3	Laskennan kuvaus .....	32
6	Tapaustutkimuskohteet .....	35
6.1	Toimistorakennus .....	35
6.1.1	Lämmitysjärjestelmän laskennallinen sähkön kulutus .....	36
6.2	Asuinkerrostalo .....	38
6.2.1	Lämmitysjärjestelmän laskennallinen sähkön kulutus .....	39
7	Aurinkokeräinjärjestelmä maalämpöjärjestelmän lisälämmönlähteenä .....	41
7.1	Aurinkokeräinjärjestelmä .....	41
7.2	Aurinkokeräinjärjestelmät toimistorakennuksessa .....	42
7.2.1	Apulaitteiden sähkön kulutus .....	43
7.2.2	Tasokeräimet maalämpöjärjestelmän lisälämmönlähteenä .....	44

7.2.3	Tyhjiökeräimet maalämpöjärjestelmän lisälämmönlähteenä.....	46
7.3	Aurinkokeräinjärjestelmät asuinkerrostalossa .....	47
7.3.1	Apulaitteiden sähkön kulutus.....	48
7.3.2	Tasokeräimet maalämpöjärjestelmän lisälämmönlähteenä .....	48
7.3.3	Tyhjiökeräimet maalämpöjärjestelmän lisälämmönlähteenä.....	51
8	Ilmalämpöjärjestelmä maalämpöjärjestelmän lisälämmönlähteenä .....	53
8.1	Ilmalämpöjärjestelmät.....	53
8.2	Ilmalämpöjärjestelmät toimistorakennuksessa.....	53
8.2.1	Apulaitteiden sähkön kulutus.....	54
8.2.2	Ilmajäähdyttimet maalämpöjärjestelmän lisälämmönlähteenä .....	54
8.3	Ilmalämpöjärjestelmät asuinkerrostalossa .....	57
8.3.1	Apulaitteiden sähkön kulutus.....	57
8.3.2	Ilmajäähdyttimet maalämpöjärjestelmän lisälämmönlähteenä .....	58
9	Lisälämmönlähteiden kannattavuus.....	61
9.1	Investointikustannukset.....	61
9.1.1	Tasokeräinjärjestelmän investointikustannukset .....	61
9.1.2	Tyhjiökeräinjärjestelmän investointikustannukset .....	61
9.1.3	Ilmalämpöjärjestelmän investointikustannukset.....	62
9.2	Laskentaparametrit .....	62
9.3	Elinkaarikustannukset .....	63
9.3.1	Tasokeräin.....	64
9.3.2	Tyhjiökeräin.....	66
9.3.3	Ilmalämpöjärjestelmä.....	67
10	Tulosten analysointi .....	70
10.1	Lisäenergialähteiden tuottama lämpöenergia .....	70
10.2	Sähkön kulutukset .....	72
10.3	Elinkaarikustannukset.....	74
11	Yhteenveto .....	78
	Lähdeluettelo .....	80
	Liitteet	

## Merkinnät

$A_c$	[m <sup>2</sup> ]	keräimen pinta-ala
$COP_{max}$	[-]	Carnot-hyötysuhde
$F_R$	[-]	aurinkokeräimen lämmönpoistokerroin
$G_{iv}$	[W/K]	rakennuksen ilmanvaihdon lämpökonduktanssi
$G_k$	[W/K]	rakennuksen rakenteiden lämpökonduktanssi
$G_{kok}$	[W/K]	rakennuksen kokonaislämpökonduktanssi
$G_t$	[W/m <sup>2</sup> ]	aurion säteilyteho keräimen pinnalle
$I_k$	[€]	lisälämmönlähddejärjestelmän investointikustannus
$K_k$	[€/v]	maalämpöjärjestelmän vuotuiset sähkön kustannukset
$LCC_{LL-MLP}$	[€]	lisälämmönlähteellä varustetun maalämpöjärjestelmän elinkaari-kustannukset
$LCC_{MLP}$	[€]	maalämpöjärjestelmän elinkaarikustannukset
$LCC_{säästöt}$	[€]	lisälämmönlähteellä varustetun maalämpöjärjestelmän säästöt elinkaarikustannuksissa verrattuna ilman lisälämmönlähdettä toimivaan maalämpöjärjestelmään
$Q_{kok}$	[kWh]	rakennuksen kokonaislämmitysenergian tarve
$Q_{komp}$	[MWh/v]	maalämpöpumpun kompressorin kuluttama sähkö vuodessa
$Q_{kvp}$	[MWh/v]	keruupiirin kiertovesipumpun kuluttama sähkö vuodessa
$Q_{kvp1}$	[MWh/v]	kiertovesipumpun 1 kuluttama sähkö vuodessa
$Q_{kvp2}$	[MWh/v]	kiertovesipumpun 2 kuluttama sähkö vuodessa
$Q_l$	[kWh]	rakennuksen tilojen lämmitysenergian tarve
$Q_{lämpö}$	[MWh/v]	maalämpöpumpun tuottama lämpöenergia vuodessa
$Q_{lkv}$	[kWh]	lämpimän käyttöveden lämmitysenergia
$Q_{SK}$	[MWh/v]	sähkökattilan kuluttama sähkö vuodessa
$Q_{sähkö}$	[MWh/v]	maalämpöjärjestelmän kuluttama sähkö vuodessa
$Q_u$	[W]	aurinkokeräimen tuottama lämpöteho
$Q_p$	[MWh/v]	ilmajäähdyttimen puhaltimien kuluttama sähkö vuodessa
$R_b$	[(mK)/W]	energiakaivon lämpöresistanssi
$S$	[°C, vrk]	lämmitystarveluku
$SCOP$	[-]	maalämpöpumpun vuosihyötysuhde
$T_b$	[°C]	energiakaivon seinän lämpötila
$\overline{T}_f$	[°C]	keruunesteen keskilämpötila koko kaivon mitalta
$T_h$	[K]	lämmönlähteen absoluuttinen lämpötila
$T_i$	[°C]	ilman vuotuinen keskilämpötila
$T_{in}$	[°C]	keruunesteen menolämpötila
$T_l$	[K]	lämmitysverkoston absoluuttinen lämpötila
$T_{lähtö,f}$	[°C]	keruunesteen lähtölämpötila
$T_m$	[°C]	maapinnan vuotuinen keskilämpötila
$T_{out}$	[°C]	keruunesteen paluulämpötila
$T_p$	[°C]	absorptiotason lämpötila
$T_s$	[°C]	rakennuksen sisäilman lämpötila
$T_{tulo,f}$	[°C]	keruunesteen tulolämpötila
$T_u$	[°C]	ulkoilman lämpötila
$T_y$	[°C]	ympäristön lämpötila

$U_b$	[W/(Km <sup>2</sup> )]	keräimen alaosan lämpöhäviökerroin
$U_e$	[W/(Km <sup>2</sup> )]	keräimen reunojen lämpöhäviökerroin
$U_L$	[W/(Km <sup>2</sup> )]	kokonaislämpöhäviökerroin
$U_t$	[W/(Km <sup>2</sup> )]	keräimen yläosan lämpöhäviökerroin
$a_1$	[W/(m <sup>2</sup> K)]	ensimmäisen kertaluokan lämpöhäviökerroin
$a_2$	[W/(m <sup>2</sup> K <sup>2</sup> )]	toisen kertaluokan lämpöhäviökerroin
$c_{pi}$	[kJ/(kgK)]	ilman ominaislämpökapasiteetti
$c_{p,kn}$	[J/(kgK)]	keruunesteen ominaislämpökapasiteetti
$c_{p,mk}$	[J/(kgK)]	maankamaran ominaislämpökapasiteetti
$c_{pf}$	[kJ/(kgK)]	keruunesteen ominaislämpökapasiteetti
$c_{ph}$	[kJ/(kgK)]	vesihöyryn ominaislämpökapasiteetti
$c_{p,v}$	[kJ/(kgK)]	veden ominaislämpökapasiteetti
$e$	[-]	sähkön hinnan eskalaatio
$h_{ilma}$	[kJ/kg]	ilman entalpia
$h_{lähtö,i}$	[kJ/kg]	lähtevän ilman entalpia
$h_{tulo,i}$	[kJ/kg]	tuloilman entalpia
$i$	[-]	inflaatio
$k$	[v]	vuosi
$l_{v,0}$	[kJ/kg]	vesihöyryn latenttilämpö referenssilämpötilassa
$\dot{m}$	[kg/s]	keruunesteen massavirta
$m_{lkv}$	[kg]	lämpimän käyttöveden massa
$m_{mk}$	[kg]	maankamaran massa
$n_0$	[-]	lämpöhäviötön hyötysuhde
$q_b$	[W/m]	lämmönsiirtoteho
$q_{geo}$	[W/m <sup>2</sup> ]	lämpövirran tiheys
$q_{vf}$	[m <sup>3</sup> /s]	keruunesteen tilavuusvirta
$q_{vi}$	[m <sup>3</sup> /s]	ilman tilavuusvirta
$r$	[-]	diskonttokorko
$r_e$	[-]	reaalikorkokanta sähkön hinnalle, diskonttokorko
$r_n$	[-]	nimelliskorkokanta
$t$	[°C]	ilman lämpötila
$x$	[kg/kg <sub>ki</sub> ]	ilman absoluuttinen kosteus
$\Delta Q$	[J]	lämpöenergian muutos
$\Delta T_{lkv}$	[K]	lämpimän käyttöveden lämmittämisen lämpötilaero
$\Delta T_{mk}$	[K]	maakamaran lämpötilan muutos
$\phi_{ilma}$	[W]	ilman kokonaisteho
$\Phi_{iv}$	[(k)W]	ilmanvaihdon lämmitysteho
$\Phi_k$	[(k)W]	rakennuksen johtumishäviöiden teho
$\Phi_l$	[(k)W]	rakennuksen lämmitystehon tarve
$\Phi_{lk}$	[(k)W]	lämpökuormat
$\alpha$	[-]	absorbaattorin absorptiokerroin
$\partial T / \partial h$	[K/m]	lämpötilagradientti
$\eta_c$	[-]	Carnot-hyvyyskerroin
$\lambda$	[W/(Km)]	kivilajin lämmönjohtavuus
$\rho_f$	[kg/m <sup>3</sup> ]	keruunesteen tiheys
$\rho_i$	[kg/m <sup>3</sup> ]	ilman tiheys
$\tau$	[-]	suojalasin läpäisevyyskerroin



## Lyhenteet

EED	Earth Energy Designer
GSHP	Groud Source Heat Pump
LCC	Life Cycle Cost
MLP	Maalämpöpumppu
TMA	Takaisinmaksuaika
TRY2012	Energialaskennan testivuodet nykyilmastossa

# 1 Johdanto

## 1.1 Tutkimuksen tausta

Maalämpöjärjestelmien käyttö rakennusten lämmitysjärjestelminä on kasvanut nopeasti viimeisen kymmenen vuoden aikana. Syitä kasvaneeseen suosioon on monia. Syitä ovat esimerkiksi maalämpöjärjestelmän alhaiset käyttökustannukset verrattuna kaukolämpöön, maalämmön ympäristöystävällisyys sekä sen pienempi riippuvuus energiahinnoista.

Kaupunkialueilla rakennukset on rakennettu tyypillisesti lähelle toisiaan ja rakennukset ovat korkeita sekä lämmitetty nettoala on suuri tontin kokoon nähden. Tämä aiheuttaa ongelmia maalämpöjärjestelmän hyödyntämisessä, koska tontille ei mahdu riittävästi energiakaivoja. Tämän tyyppisissä kohteissa voidaan hyödyntää aurinko- ja ilmalämpöä lisäenergialähteenä maalämpöjärjestelmän rinnalla tai maalämpöjärjestelmää tukevana. Aurinko- ja ilmalämpöä voidaan hyödyntää suoraan rakennuksen käyttöveden ja tilojen lämmityksessä tai välillisesti lämmittämällä maalämpöjärjestelmän keruunesteen lämpötilaa tai lataamalla energiakaivokenttään.

Lisäksi aurinko- ja ilmalämpöä voidaan hyödyntää jo olemassa olevien energiakaivokenttien regeneroimisessa. Energiakaivokentät jäähtyvät vuosien saatossa, jos niitä käytetään pääsääntöisesti lämmitykseen eikä niitä juurikaan ladata. Energiakaivokentän matalampi lämpötila laskee maalämpöjärjestelmän keruunesteen lämpötilaa ja näin myös maalämpöpumpun hyötysuhdetta. Energiakaivokentän jäähtyminen voi johtaa lopulta jopa pohjaveden sekä maa- ja kallioperän jäätymiseen energiakaivon ympärillä, mikä johtaa maalämpöpumpun toimintahäiriöihin.

## 1.2 Tutkittava ongelma ja työn tavoitteet

Maalämpöjärjestelmän energiatehokkuutta voidaan parantaa aurinko- tai ilmalämmöllä sellaisissa rakennuksissa, joissa energiakaivokentän mitoittavana tekijänä on rakennuksen lämmitysenergian tarve. Näin on tyypillisesti kylmissä ilmastoissa, kuten Suomessa. Aurinko- tai ilmalämpöjärjestelmän asentaminen lisää investointikustannuksia, mutta voi vähentää oikein mitoittettuna lämmitysjärjestelmän ostoenergian määrää. Aurinkolämpöä voidaan hyödyntää ensisijaisesti rakennuksen käyttöveden ja tilojen lämmitykseen sekä maalämpöjärjestelmän keruunesteen lämpötilan nostamiseen, ja toissijaisesti energiakaivokentän lataamisessa. Ilmalämpöä hyödynnetään maalämpöjärjestelmän keruunesteen lämpötilan nostamisessa ja energiakaivokentän lataamisessa.

Tämän diplomityön tutkimusongelmana on aurinko- ja ilmalämpöjärjestelmän kannattavuuden tutkiminen maalämpöjärjestelmän energiatehokkuuden parantamisessa. Työn tavoitteena on saada selville, onko aurinko- tai ilmalämpöjärjestelmän asentaminen lisäenergialähteeksi maalämpöjärjestelmän rinnalle taloudellisesti kannattavaa tarkasteltaessa järjestelmän elinkaarikustannuksia. Elinkaarikustannuksissa huomioidaan aurinko- ja ilmalämpöjärjestelmien investointikustannukset sekä vuotuiset käyttö- ja investoinnin rahoituskustannukset elinkaaren ajalta. Investointikustannuksiin lasketaan järjestelmien tärkeimpien komponenttien hankinta- ja asennuskustannukset. Vuotuisissa käyttökustannuksissa otetaan huomioon lämpöpumpun kompressorin sekä järjestelmän kiertovesipumppujen sähkön kulutus, inflaatio, energian hinnan eskalaatio ja rahoituksen korkokanta. Tutkimusongelmaa tarkastellaan kahden olemassa olevan rakennuksen energiankäytön kautta. Toinen rakennuksista

on Kanta-Hämeessä sijaitseva asuinkerrostalo ja toinen toimistorakennus Varsinais-Suomessa. Maalämpöjärjestelmää sekä aurinko- ja ilmalämmön hyödyntämistä tarkastellaan rakennusten lämmitysenergiankäyttöprofiilin perusteella.

Kannattavuuden tutkiminen suoritetaan laskemalla erikokoisten aurinko- ja ilmalämpöjärjestelmien kannattavuutta esimerkkirakennuksien tapauksessa. Lisäenergialähteistä saatava lämpöenergia lasketaan esimerkkirakennusten paikkakuntien auringon säteilymäärän ja ulkoilman lämpötilan perusteella. Maalämpöpumpun hyötysuhdetta eri toimintapisteissä arvioidaan käyttämällä erään maalämpöpumpun testituloksia. Energiakaivokentän lämpötilatasojen mallintamisessa käytetään EED (Earth Energy Designer) simulointiohjelmaa. Laskennan avulla selvitetään lisäenergialähteiden vaikutusta maalämpöjärjestelmän sähköenergian kulutukseen. Kannattavuutta arvioidaan vertaamalla esimerkkirakennuksien maalämpöjärjestelmän kuluttaman nykyisen sähköenergian määrää laskennalliseen sähköenergian kulutukseen, kun aurinko- tai ilmalämpöjärjestelmä on kytketty rinnalle.

### **1.3 Tutkimuksen rajaukset**

Tämän diplomityön ulkopuolelle on rajattu rakennukset, joissa maalämpöjärjestelmää käytetään myös rakennuksen jäähdyttämiseen. Aurinko- ja ilmalämmön käyttäminen energiakaivokentän lataamisessa kesäaikaan nostaa energiakaivokentän lämpötilaa ja näin ollen laskee energiakaivokentän jäähdytystehoa. Energiakaivokentän käyttäminen jäähdytykseen rajoittaisi energiakaivokenttään ladattavan lämpöenergian määrää, eikä lisäenergialähteistä mahdollisesti saatavilla olevaa lämpöenergiaa pystyittäisi lataamaan kallioperään. Tämä heikentäisi lisäenergialähteiden kannattavuutta.

Aurinkolämmön käyttämistä maalämpöjärjestelmän lisäenergialähteenä tarkastellaan vain energiakaivokentän lataamisessa ja keruunesteen lämpötilan nostamisessa. Tutkimuksen ulkopuolelle jätetään aurinkolämmön suora hyödyntäminen esimerkiksi lämpimän käyttöveden lämmittämisessä.

Tässä diplomityössä ei otetaan huomioon sähkön hinnan vuorokausi- tai vuodenaikaisvaihtelua. Sähkön hinta oletetaan vakioiksi vuoden aikana, ja elinkaarikustannuksia laskettaessa sähköenergian hinnalle määritetään kolme eri eskalaatiokerrointa.

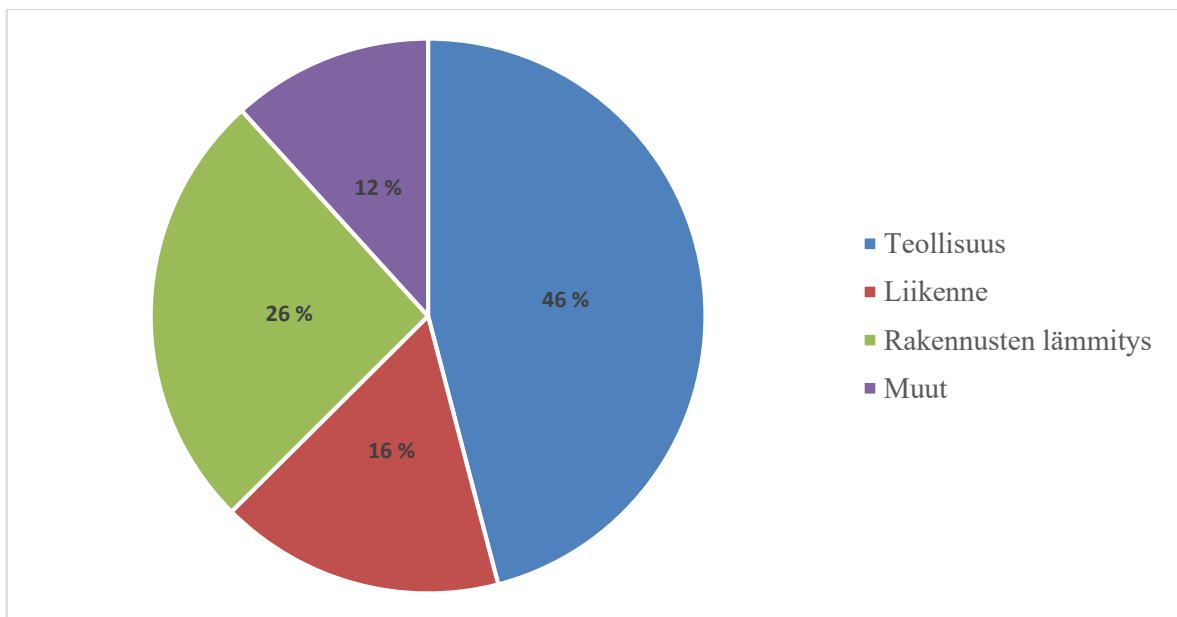
## 2 Rakennusten lämmöntarve ja maankamara lämpöpumpun lämmönlähteenä

Seuraavassa käsitellään kiinteistöjen lämmitystarveprofiilia sekä maankamaran lämpötilaa ja maankamaran lämmöntuottoon vaikuttavia tekijöitä Suomessa. Lisäksi käsitellään maalämpöpumpun keruunesteen lämpötilan vaikutusta maalämpöpumpun hyötysuhteeseen kirjallisuuskatsauksen perusteella.

### 2.1 Rakennusten lämmitystarveprofiili Suomessa

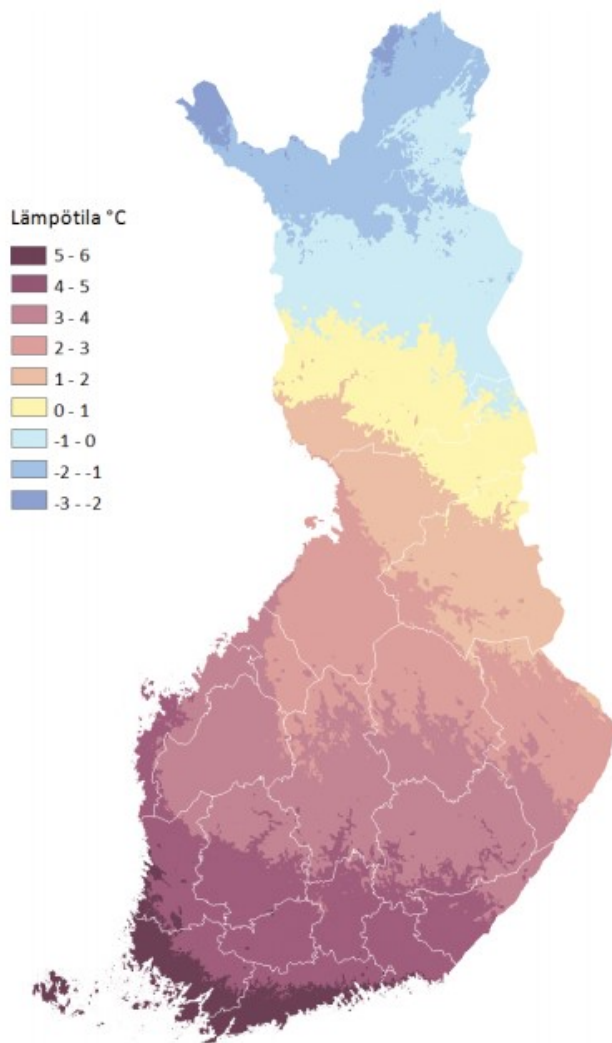
Mitoitettaessa maalämpöjärjestelmää, on rakennuksen lämmitystarveprofiilin tunteminen tärkeää. Rakennuksen lämmitystarveprofiilia tarvitaan myös tarkasteltaessa lisäenergialähteiden käyttöä, jotta voidaan arvioida lisäenergialähteen suoraa tai välillistä hyödyntämistä rakennusten lämmityksessä.

Suomessa rakennusten lämmitykseen kuluu merkittävä osa energian loppukäytöstä, eli energiasta josta on vähennetty energian siirto- ja muuntohäviöt. Energian loppukäyttö oli Suomessa vuonna 2016 308 TWh, josta rakennusten lämmitykseen kului 79 TWh:a eli 26 % (kuva 1) energian loppukäytöstä. 2010-luvulla rakennusten lämmityksen loppuenergian käyttö on vaihdellut 74-85 TWh välillä. [1]



Kuva 1 Energian loppukäytön jakauma teollisuuden, liikenteen, rakennusten lämmityksen ja muut kesken vuonna 2016 Suomessa.

Rakennusten lämmitystekniikan kannalta ulkoilman lämpötila on tärkein meteorologinen suure, ja sillä on merkittävä vaikutus rakennuksen tehon tarpeeseen, laitteiden mitoittamiseen sekä energian kulutukseen. [2] Suomessa vuotuinen ilman keskilämpötila nousee melko tasaisesti kuljettaessa lounaasta koilliseen päin, kuten kuvasta 2 nähdään. Keskilämpötila vaihtelee lämpimimmän lounaisosan + 5 - 6 °C:ta Luoteis-Lapin kylmimpään -3 - (-2) °C:een. Vuoden keskilämpötilan nollaraja kulkee suurin piirtein akselilla Kuusamo – Rovaniemi – Pello. [3]



Kuva 2 Ulkoilman vuotuinen keskilämpötila Suomessa vuosien 1981-2010 tilastojen perusteella. [4]

Rakennuksen lämmitysenergian tarpeeseen vaikuttavat lämpöhäviöt rakenteiden läpi, ilmanvaihto, käyttövesi ja lämpökuormat eli sisäiset lämpökuormat ja auringon säteilyn aiheuttamat lämpökuormat. Rakennuksen lämpötehon tarve vaihtelee ajan suhteen ulkoilman lämpötilan mukaan ja se voidaan esittää yhtälöllä (1)

$$\Phi_l(t) = \Phi_k + \Phi_{iv} - \Phi_{lk}, \quad (1)$$

missä

$\Phi_l$	on rakennuksen lämmitystehon tarve $[(k)W]$
$\Phi_k$	on rakennuksen johtumishäviöiden teho $[(k)W]$
$\Phi_i$	on ilmanvaihdon lämmitysteho $[(k)W]$
$\Phi_{lk}$	on lämpökuormat $[(k)W]$

Vuotuinen rakennuksen kokonaislämmitysenergiantarve voidaan määrittää seuraavalla yhtälöllä (2)

$$Q_{kok} = Q_l + Q_{lkv} = \int_0^{8760\ h} \Phi_l(t) dt + m_{lkv} c_p \Delta T_{lkv}, \quad (2)$$

missä

$Q_{kok}$	on rakennuksen kokonaislämmitysenergiantarve [kWh]
$Q_l$	on rakennuksen tilojen lämmitysenergiantarve [kWh]
$Q_{lkv}$	on lämpimän käyttöveden lämmitysenergia [kWh]
$m_{lkv}$	on lämpimän käyttöveden massa [kg]
$c_{p,v}$	on veden ominaislämpökapasiteetti [kJ/(kgK)]
$\Delta T_{lkv}$	on lämpimän käyttöveden lämmittämisen lämpötilaero [K]

Rakennuksen lämmitysenergiantarvetta voidaan arvioida eri menetelmillä. Tilojen lämmitysenergiantarvetta voidaan arvioida lämmitystarvelukujen avulla kuukausi tai vuositasolla yhtälöllä (3)

$$Q_l = (G_k + G_{iv}) \int_{t_1}^{t_2} (T_s - T_u) dt = G_{kok} \cdot 24 \cdot S, \quad (3)$$

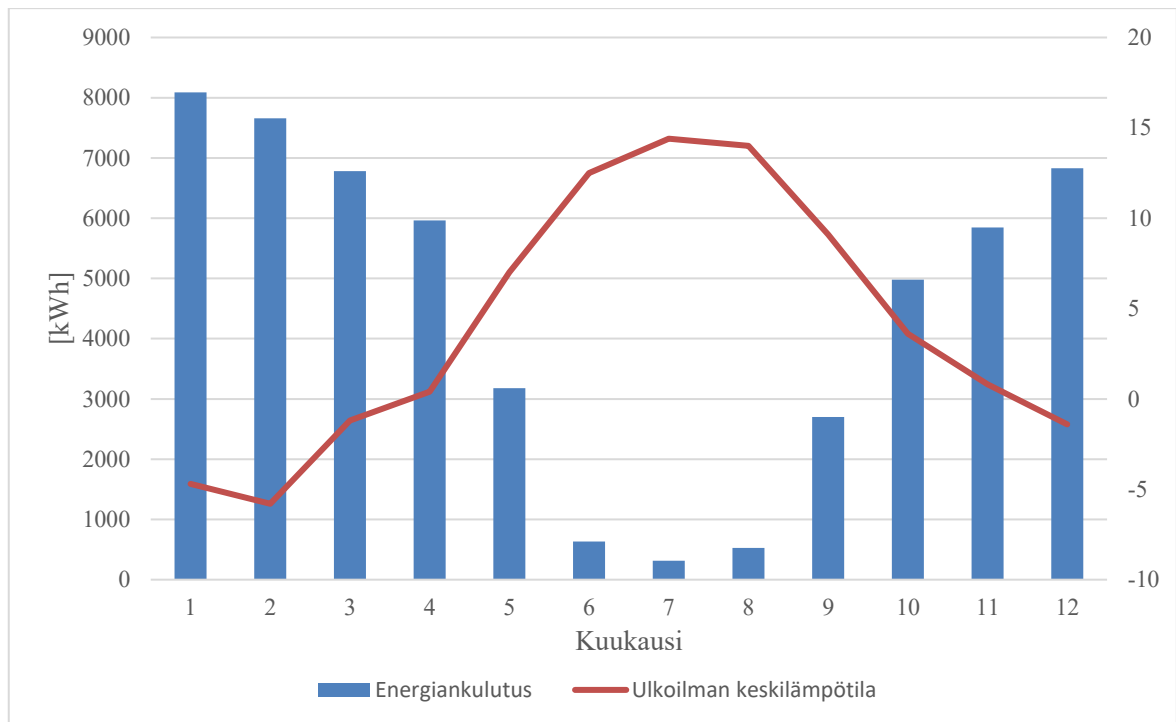
missä

$G_k$	on rakennuksen rakenteiden lämpökonduktanssi [W/K]
$G_{iv}$	on rakennuksen ilmanvaihdon lämpökonduktanssi [W/K]
$T_s$	on rakennuksen sisäilman lämpötila [°C]
$T_u$	on ulkoilman lämpötila [°C]
$G_{kok}$	on rakennuksen kokonaislämpökonduktanssi [W/K]
$S$	on lämmitystarveluku [°C, vrk]

Arvioitaessa rakennuksen lämmitysenergiantarvetta tuntitasolla, voidaan käyttää TRY2012 energialaskennan testivuodet nykyilmastossa- tuntiaineistoa. Tuntikohtainen energiantarve voidaan arvioida yhtälöllä (4)

$$Q_l = (G_k + G_{iv}) \int_{t_1}^{t_2} (T_s - T_u) dt, \quad (4)$$

Kuvassa 3 on esitetty teoreettisen rakennuksen tilojen lämmitystarveprofiili kuukausitasolla lämmitystarveluvun avulla laskettuna sekä kuukausittainen ulkoilman lämpötilan keskiarvo. Lämmitystarvelukuina ja ulkoilman lämpötilan keskiarvona on käytetty Jyväskylän säätiätoja vuonna 2017.



Kuva 3 Esimerkkirakennuksen tilojen lämmitysenergiantarve ja ulkoilman keskilämpötila kuukausittain. Rakennuksen kokonaislämpökonduktanssina on käytetty arvoa  $0,5 \text{ kW/K}$  ja lämmitystarvelukuina ja ulkoilman keskilämpötilana Jyväskylän arvoja vuonna 2017.

## 2.2 Maa- ja kallioperä lämmönlähteenä

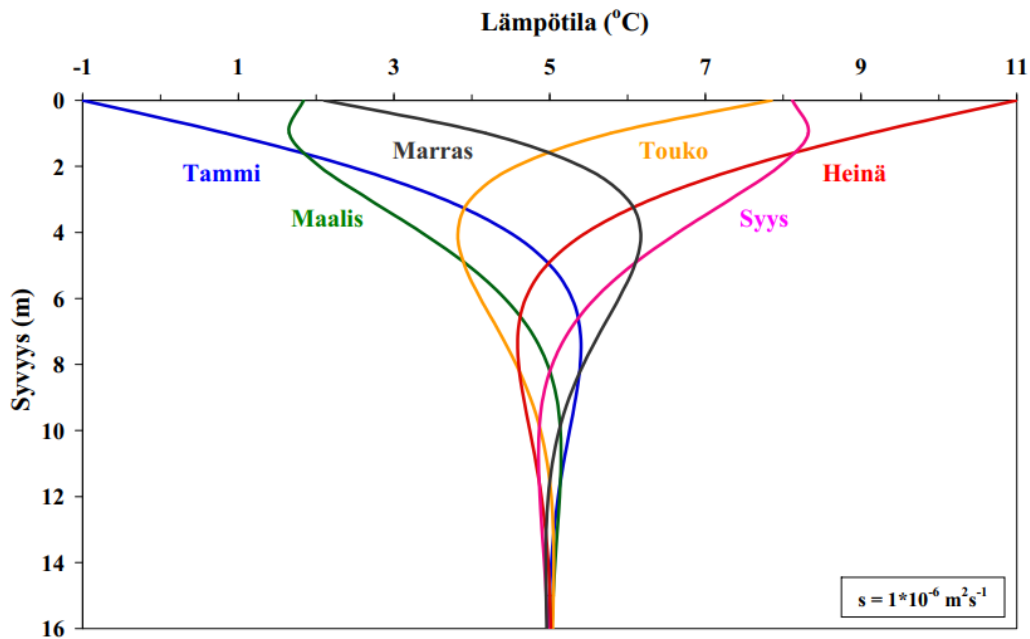
Maalämpöjärjestelmän lämmönlähteenä käytetään maa- ja kallioperään sekä vesistöihin varastoitunutta energiaa, jota kutsutaan geoenergiaksi. Geoenergia on peräisin maan ytimen ja sulan lämpöenergiasta, radioaktiivisten hajoamisprosessien lämpöenergiasta ja auringon säteilystä. [5] Yleisin tapa hyödyntää geoenergiaa on kerätä lämpöenergia erillisellä putkistolla, joka on asennettuna vaakatasoon maaperään tai syvyydeltään tyypillisesti 100-300 m syviin kallioperään porattuihin energiakaivoihin. Energiakaivot toimivat lämmönvaihtimina siirrettäessä lämpöä kallioperästä maalämpöpumpun höyrystimelle tai siirrettäessä viilenyskaudella lämpöä rakennuksesta kallioperään. Energiakaivojen etuna on kallioperän tasaisempi lämpötila vuoden ympäri sekä pienempi maapinta-alan tarve verrattuna maaperään asennettuun keruuputkistoon. Keruuputkistossa kiertää lämmönkeruuneste, jonka lämpötila on ympäristöään matalampi ja sen jäätymispiste on tyypillisesti noin  $-17 \text{ °C}$ .

Geoenergian hyödyntämiseen vaikuttaa maankamaran lämpötila ja lämpötekniset parametrit kuten lämmönjohtavuus. [5] Maankamaran lämpötilaa ja lämpötekniisiä ominaisuuksia käsitellään seuraavissa luvuissa.

### 2.2.1 Maa- ja kallioperän lämpötila

Maanpinnalla ulkoilmassa tapahtuvat lämpötilamuutokset vaikuttavat maankamaran lämpötilaan. Noin 10 000 vuotta sitten päättyneen jääkauden aiheuttaman jäähdyttämisen katsotaan laskeneen Suomen kallioperän geotermistä gradienttia kallioperän yläosassa. Pohjois-Ruotsissa jääkauden on arvioitu heikentäneen geotermistä gradienttia noin 10-20 %. Pora-kaivoista ja kairareijistä tehdyistä lämpötilamittauksista on havaittu, että geotermiset gradienttiarvot kasvavat selkeästi syvemmälle mentäessä. [6]

Vuoden ajat vaikuttavat maankamaran lämpötilaan vain noin 10-15 metrin syvyyteen maanpinnasta maankamaran ollessa häiriöttömässä tilassa. Kuvassa 4 on kuvattu maankamaran lämpötilan vaihtelua eri vuodenaikojen mukaan.



Kuva 4 Maanpinnan laskennallinen lämpötilan vaihtelu vuodenaikojen mukaan 0-16 m syvyydellä. Käytetyt arvot; maanpinnan keskilämpötila 5 °C, amplitudi 6 °C ja terminen diffusiviteetti  $s = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . [7]

Maankamaran keskilämpötila on riippuvainen alueen ilman vuotuisesta keskilämpötilasta, joka vaihtelee Suomessa leveyspiirien mukaan. Kuvassa 5 on esitetty Suomen ulkoilman ja maanpinnan vuotuiset keskilämpötilat. Kuvasta nähdään, että maanpinnan vuotuinen keskilämpötila on keskimäärin 2 °C korkeampi kuin ulkoilman lämpötila. Kukkosen [6] tekemän tutkimuksen mukaan Suomessa voidaan havaita lineaarinen riippuvuus ilman ja maanpinnan vuotuisen keskilämpötilan välillä, ja maan pinnan vuotuinen keskilämpötila voidaan laskea yhtälöllä (5)

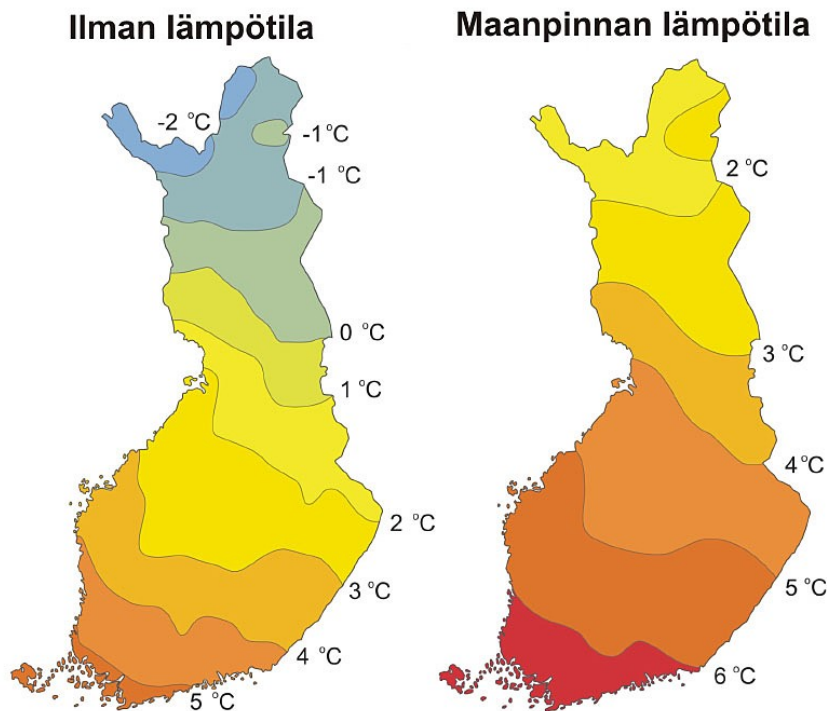
$$T_m = 0,71 \cdot T_i + 2,93, \quad (5)$$

missä

$T_m$  on maanpinnan vuotuinen keskilämpötila [°C]  
 $T_i$  on ilman vuotuinen keskilämpötila [°C]

Yhtälön (5) määrittelyssä käytetty keskilämpötila  $T_i$ :n arvo on ilmastolliselta vertailukaudelta 1931-1960.

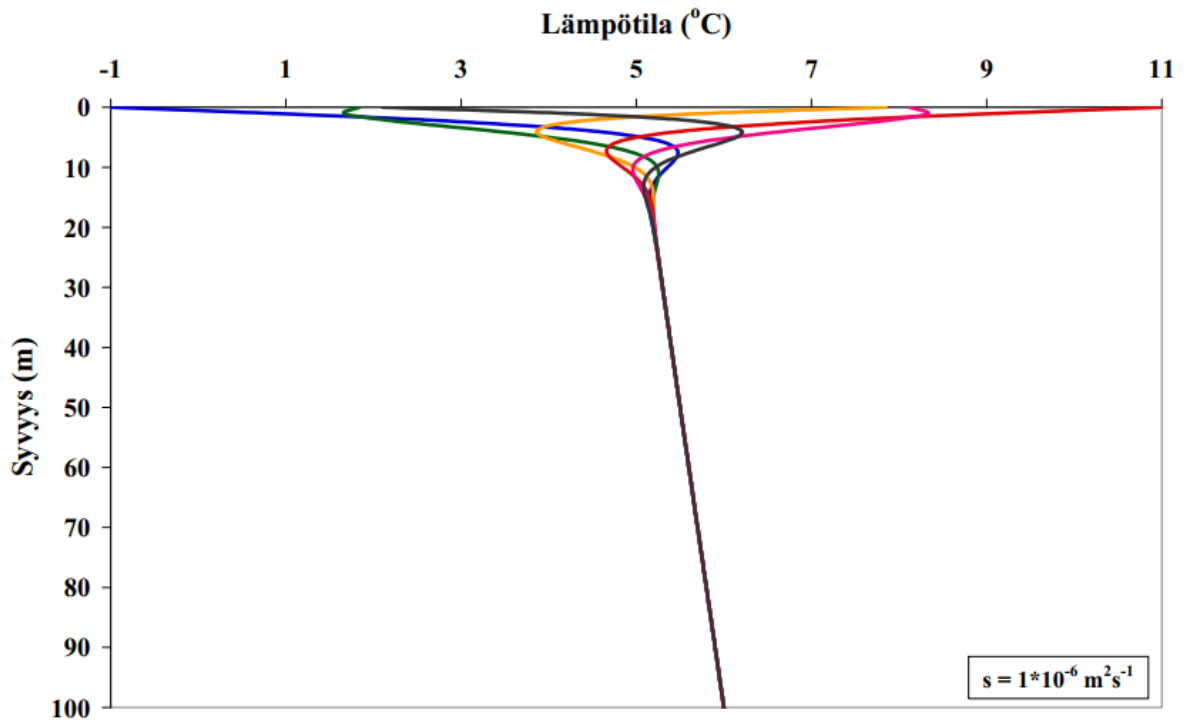




Kuva 5 Ilman ja maanpinnan vuotuinen keskilämpötila alueellisesti vuosien 1971-2000 tilastojen perusteella. [8]

Kuten aikaisemmin todettiin, maankamaran lämpötila on noin 10-15 metrin syvyydessä maanpinnasta vakio vuoden ajasta riippumatta, ja lämpötila tällä syvyydellä on maanpinnan lämpötilan vuodenaikaisvaihteluiden keskiarvo. Syvemmälle mentäessä maankamaran lämpötila kasvaa Suomessa keskimäärin  $0,8-1,5\text{ °C} / 100\text{ m}$ . Tämä lämpötilan nousu johtuu suurimmilta osin geotermisen lämpövuon vaikutuksesta, ja sitä kutsutaan geotermiseksi gradientiksi. [5] Radioaktiivisten isotooppien, kuten uraanin, toriumin ja kaliumin hajoamisen seurauksena lämpötilagradientti saattaa olla graniiteissa hieman korkeampi ( $2-4\text{ °C} / 100\text{ m}$ ). [9]

Kuvassa 6 on esitetty häiriöttömän maankamaran teoreettinen lämpötila syvyydellä 0-100 m, kun geotermisen gradientti on huomioitu. Kuvasta nähdään kuinka ulkoilman lämpötilan vuodenaikaiset vaihtelujen vaikutukset loppuvat 10-15 syvyydessä. Syvemmälle mentäessä maankamaran lämpötila määräytyy alueen ulkoilman keskilämpötilasta ja geotermisestä gradientista. Näin ollen alueen ulkoilman keskilämpötilan ja geotermisen gradientin avulla voidaan arvioida maankamaran lämpötilaa tietyllä alueella.



Kuva 6 Maankamaraan laskennallinen lämpötila 0-100 m syvyydellä. Käytetyt arvot; maanpinnan keskilämpötila 5 °C, amplitudi 6 °C, terminen diffusiviteetti  $s = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  ja geoterminen gradientti 1,0 °C / 100 m. [7]

### 2.2.2 Maa- ja kallioperän lämmöntuottoon vaikuttavat tekijät

Suomessa maapallon sisältä tuleva geoterminen lämpövuoto on vain 0,03 – 0,05  $\text{W}/\text{m}^2$ , joka vastaa Suomessa havaittuja geotermisiä gradientteja. Pienellä geotermisellä lämpövuolla ei ole suurta merkitystä geoenergian hyödyntämisessä. Geoenergian hyödyntäminen perustuu pääosin lämmönkeruujärjestelmää ympäröivän maankamaraan massan lämpökapasiteettiin ja auringon säteilyn energiaan. [5] Tarkasteltaessa tiettyä maankamaraan tilavuutta, lämpötilan muutos  $\Delta T$  aiheuttaa lämpöenergian muutoksen  $\Delta Q$  tilavuuden suhteen, kun maankamara oletetaan homogeeniseksi. Lämpötilamuutoksen aiheuttama muutos maankamaraan lämpöenergiasisältöön voidaan laskea yhtälöllä (6) [10]

$$\Delta Q = c_p m \Delta T, \quad (6)$$

missä	
$\Delta Q$	on lämpöenergian muutos [J]
$m_{mk}$	on maankamaraan massa [kg]
$\Delta T_{mk}$	on maankamaraan lämpötilan muutos [K]
$c_{p,mk}$	on maankamaraan ominaislämpökapasiteetti [ $\text{J}/(\text{kgK})$ ]

Kivilajien ominaislämpökapasiteeteissa ei ole suurta poikkeamaa ja keskiarvo on noin 850  $\text{J}/(\text{kgK})$ . Kallioperän lämpötarkasteluissa puhutaan yleisemmin tilavuuslämpökapasiteetista  $c_v [\text{J}/(\text{m}^3\text{K})]$ , jossa aineen ominaislämpökapasiteetti on kerrottu aineen tiheydellä  $\rho [\text{kg}/\text{m}^3]$ . [9]

Maankamaran lämmöntuottoon vaikuttaa lämpötilan ohella kivilajien mineraalien lämmönjohtavuus. Suomessa kivilajien mineraalien lämmönjohtavuus vaihtelee noin  $2 - 6 \text{ W/Km}$  välillä [5] ja on keskimäärin  $3,24 (\pm 1,0) \text{ W/Km}$ . [11] Maalajien lämmönjohtavuus vaihtelee noin  $1,0 - 2,0 \text{ W/Km}$  välillä ja lämmönjohtavuuden arvo on voimakkaasti riippuvainen maaperän kosteudesta. [5] Energiakaivoista saatava lämpöenergia perustuu pääasiassa kalliosta keruunesteeseen johtuvaan lämpöön ja tätä voidaan kuvata Fourierin ensimmäisen lain eli lämmönjohtavuuslain mukaan yhtälöllä (7)

$$q_{geo} = -\lambda \frac{\partial T}{\partial h}, \quad (7)$$

missä

$q_{geo}$	on lämpövirran tiheys [ $\text{W/m}^2$ ]
$\lambda$	on kivilajin lämmönjohtavuus [ $\text{W/(Km)}$ ]
$\partial T / \partial h$	on lämpötilagradientti [ $\text{K/m}$ ]

Energiakaivon ympärille muodostuva lämpötilagradientti vaihtelee kaivon kuormituksen ja ajan suhteen. Vaihtelun nopeus hidastuu etäisyyden kasvaessa energiakaivosta, mutta kaivojen terminen vaikutusalue voi vuosien mittaan ulottua kymmenien metrien päähän kaivosta. [5] Monen energiakaivon kentissä kaivojen keskinäinen tai vierekkäisten energiakaivokenttien vuorovaikutus tulee ottaa huomioon suunnittelussa. Kaivojen keskinäinen vaikutus ilmenee yleensä vasta vuosien päästä, ja tällä voi olla merkittävä vaikutus energiakaivokentän toimintavarmuuteen. [12] Kaivojen keskinäistä vuorovaikutusta voidaan pienentää kaivokentän muodolla, ja kaivokentän konfiguraatiolla onkin merkittävä vaikutus energiakaivokentän toimintaan pitkän ajan tarkasteluissa.

Maankamaran lämmönjohtavuuden lisäksi lämpöenergian siirtymiseen maakamarasta maalämpöpumpun keruunesteeseen vaikuttaa energiakaivon lämpöresistanssi. Lämpöresistanssin arvo määrää keruunesteen ja energiakaivon seinämän välisen lämpötilaeron tietyllä lämmönsiirtoarvolla. Lämpöresistanssin arvoon vaikuttaa muun muassa energiakaivon täyteaine, lämmönkeruuputken materiaali, geometria ja sijainti kaivossa, lämmönsiirtonesteen virtaama sekä energiakaivon halkaisija [13]. Energiakaivon lämpöresistanssi voidaan määrittellä yhtälöllä (8)

$$R_b = \frac{\overline{T}_f - T_b}{q_b}, \quad (8)$$

missä

$R_b$	on energiakaivon lämpöresistanssi [ $(\text{mK})/\text{W}$ ]
$\overline{T}_f$	on keruunesteen keskilämpötila koko kaivon mitalta [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$T_b$	on energiakaivon seinän lämpötila [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$q_b$	on lämmönsiirtoteho [ $\text{W/m}$ ]

Energiakaivon lämpöresistanssilla voi olla suuri merkitys järjestelmän tehokkuuteen, ja sen arvo tulisi olla mahdollisimman pieni. Tyypillinen lämpöresistanssin arvo noin  $0,08-0,10 [(\text{mK})/\text{W}]$  vesitäytteiselle energiakaivolle, josta otetaan lämpöä, ja lämmönkeruuputkena on halkaisijaltaan 40 mm muoviputki. Lämpöresistanssin arvolla on suuri merkitys etenkin

kohteissa, joissa energiakaivoja ladataan suurilla tehoilla ja operoidaan korkeilla lämpötiloilla, kuten aurinkolämpöjärjestelmissä, ja otettaessa energiakaivokentistä suuria tehoja matalilla lämpötiloilla. [13]

Edellä mainittujen maankamaran lämmönjohtavuuden ja energiakaivon lämpöresistanssin määrittäminen ovat tärkeitä parametreja suunniteltaessa energiakaivokenttää. Nämä parametrit voidaan määrittää energiakaivosta TRT-testin (Thermal Response Test) avulla. TRT-testin avulla voidaan määrittää energiakaivoa ympäröivän kalliomassan tehollinen lämmönjohtavuus ja energiakaivon tehollinen lämpöresistanssi. Testin tuloksena saatuja parametreja hyödynnetään energiakaivokentän simuloinneissa. Tarkempaa tietoa TRT-testistä löytyy esimerkiksi lähteestä [13].

Myös pohjavedellä on merkitystä energiakaivojen lämmönsiirtoon. Pohjoismaissa energiakaivot täyttyvät yleensä luonnollisesti pohjavedellä, eikä kaivoja yleensä täytetä täyteaineella. Veden lämmönjohtavuus on  $0,6 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  [13] ja ilman vain  $0,026 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ . Näin ollen pohjaveden pinnan syvyydellä maanpinnasta on suuri merkitys energiakaivosta hyödynnettävissä olevaan osaan. Yleisesti puhutaan energiakaivon aktiivisyvyydestä eli syvyydestä, joka on pohjaveden ympäröimänä vuoden ympäri ja lämmönsiirtoa kallioperän ja keruunesteen välillä tapahtuu. Suomessa pohjaveden pinta on yleensä 1-4 metrin syvyydessä maanpinnasta, mutta saattaa olla jopa 20 metrin syvyydellä harjuissa ja kallioperässä. Lisäksi pohjaveden pinta vaihtelee hieman (noin 0,1-1,0 m) vuodenaikojen mukaan. [14]

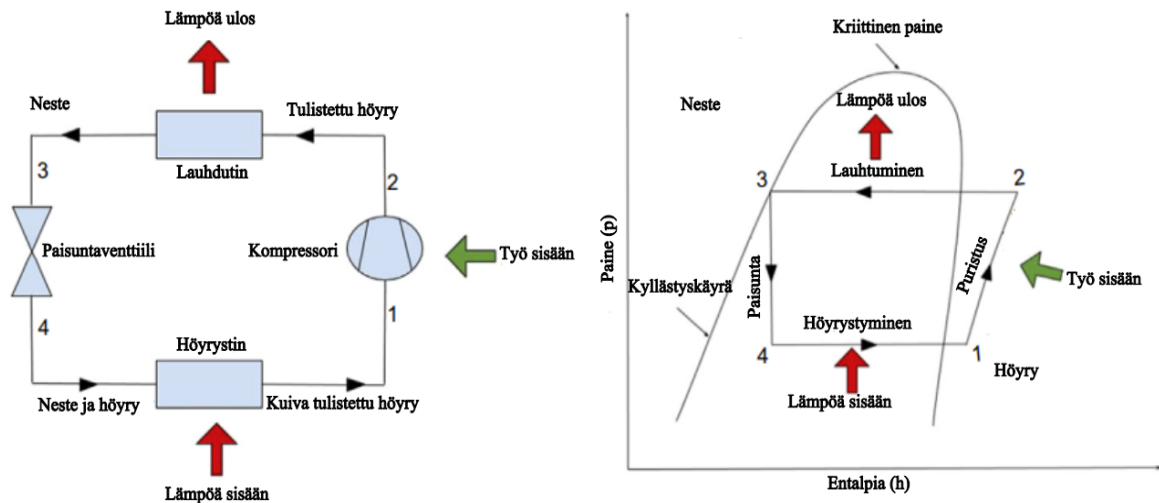
Energiakaivon lämmöntuotantoon vaikuttaa pohjaveden liike. Energiakaivokentän alueella voi esiintyä pohjaveden maansuuntaista virtaamista alueen hydraulisten gradienttien johdosta tai pohjaveden virtaamista energiakaivoissa luonnollisen konvektion seurauksena. Maansuuntainen pohjaveden virtaus voi kuljettaa energiakaivokentän ympäriltä pohjaveteen sitoutunutta lämpöenergiaa energiakaivokentän alueelle, ja nostaa energiakaivokentän lämpötilaa. Toisaalta regeneroitaessa energiakaivokenttää, pohjaveden virtauksella voi olla haitallisia vaikutuksia sen kuljettaessa kaivokenttään ladattua lämpöenergiaa pois kaivokentän alueelta. Pohjaveden virtaus on erityisen haitallista hyödynnettäessä energiakaivoja porakaivovarastona, joiden varastointilämpötila on korkea. Van Meursin mukaan pohjaveden virtaus tulisi olla alle  $0,05 \text{ m}/\text{vrk}$ , jotta pohjavesi ei kuljettaisi lämpöenergiaa pois porakaivovarastosta. [15] Schmidt et al. mukaan pohjaveden virtausnopeus pitäisi olla alle metrin vuodessa. [16]

Lämmönsiirto aiheuttaa luonnollisen konvektion energiakaivon täyteaineena olevassa pohjavedessä ja ympäröivässä vettä läpäisevässä maankamarassa. Luonnollista konvektiota esiintyy erityisesti korkeissa lämpötiloissa ja suurissa lämmönsiirtoarvoissa, kuten regeneroitaessa energiakaivoa aurinkolämmöllä. Luonnollisen konvektion ansiosta energiakaivon lämpöresistanssi laskee ja lämmönsiirto tehostuu lämmönsiirtonesteen ja kalliomassan välillä. [13]

## **2.3 Keruunesteen lämpötilan vaikutus maalämpöpumpun hyötysuhteeseen**

Maalämpöpumppu, kuten muutkin lämpöpumput, käyttävät mekaanista energiaa siirtämään lämpöä matalalämpötilaisesta lämmönlähteestä korkealämpötilaiseen lämpönieluun. Prosessi perustuu lämpöpumpun suljettuun kylmäainekiertoon. Lämpöpumpun höyrystimellä kylmäaine höyrystyy (kuva 7, 4-1) keräten energiaa matalalämpöisestä lämmönlähteestä.

Höyrystynyt kylmäaine puristetaan (vaihe 1-2 kuvassa 7) mekaanisesti kompressorilla korkeampaan paineeseen, ja samalla kylmäaineen lämpötila nousee korkeammaksi. Lämpöpumpun korkealämpötilaisella lauhduttimella kylmäaine lauhtuu (vaihe 2-3 kuvassa 7) luovuttaen lämpöä lämpönieluun. Lopuksi kylmäaineen paine alennetaan (vaihe 3-4 kuvassa 7) paisuntaventtiilissä ennen sen päätymistä takaisin höyrystimelle. Lämpöpumppujen etuna perinteisiin lämmöntuotantojärjestelmiin on niiden pienempi primäärienergiankulutus verrattuna lämpöpumpun tuottamaan lämpöenergiaan. Höyrystimellä kerätty energia on huomattavasti suurempi kuin lämpöpumpun kompressorin kuluttama sähköenergia.[2,17]



Kuva 7 Vasemmalla esitetty lämpöpumpun kylmäainekierto prosessi pääkomponenteilla. Oikealla teoreettinen kylmäainekierto prosessi log p, h-tilapiirroksessa. [17]

Klassisessa termodynamiikassa lämpöpumpun käyttämän ja tuottaman energian suhdetta kuvataan hyötysuhteella COP (Coefficient of Performance). Tälle hyötysuhteelle on olemassa teoreettinen maksimiarvo, jota kutsutaan Carnot-hyötysuhteeksi. Carnot-hyötysuhde lasketaan yhtälöstä (9)

$$COP_{max} = \frac{T_l}{T_l - T_h}, \quad (9)$$

missä

$COP_{max}$

on Carnot-hyötysuhde [-]

$T_l$

on lämmitysverkoston absoluuttinen lämpötila [K]

$T_h$

on lämmönlähteen absoluuttinen lämpötila [K]

Todellisen lämpöpumpun hyötysuhde on huomattavasti matalampi kuin teoreettinen Carnot-hyötysuhde, mutta yhtälöstä (9) voidaan nähdä, että hyötysuhde on sitä korkeampi mitä lähempänä lämmönlähteen ja lämpönielun lämpötilat ovat toisiaan. [17] Näin ollen korkeampi lämmönlähteen lämpötila parantaa lämpöpumpun hyötysuhdetta, ja lisäenergiälähteiden käyttö lämmönlähteen lämpötilan nostamisessa on teknisesti järkevää.

Todellisessa lämpöpumpussa tapahtuu useita lämpöhäviöitä, kuten lämpöpumpun höyrystimen ja lauhduttimen lämmönvaihtimilla. Todellinen hyötysuhde voidaan esittää yhtälöllä (10)

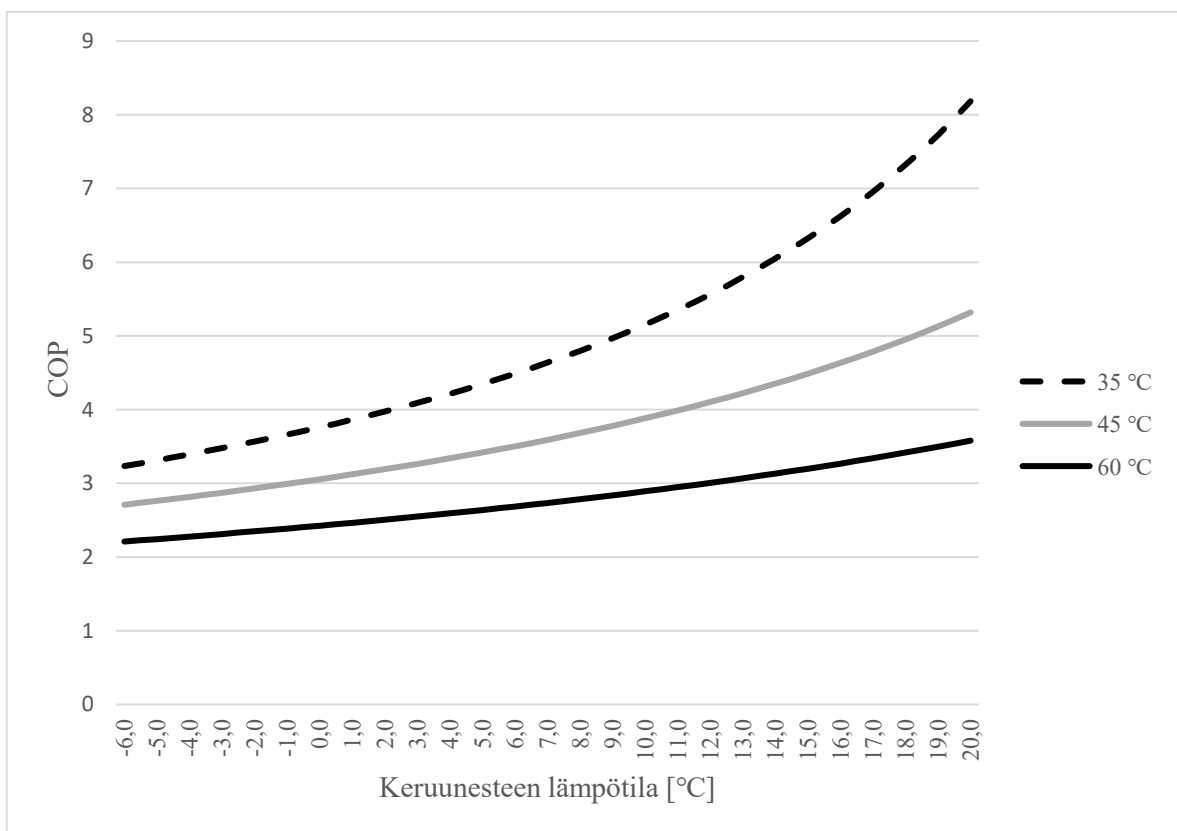
$$COP = \eta_c \frac{T_l}{T_l - T_h}, \quad (10)$$

missä

$\eta_c$

on Carnot-hyvyyskerroin [-]

Carnot-hyvyyskerroimen arvo on yleensä alueella 0,35-0,55 ja sen arvoon vaikuttaa kylmäaineen ominaisuudet, lämpötilat  $T_l$  ja  $T_h$ , tehon kokoluokka sekä kompressorin laatu. [18] Kuvassa 8 on esitetty keruunesteen lämpötilan vaikutus lämpöpumpun hyötysuhteeseen eri lämmitysverkoston menoveden lämpötiloilla.



Kuva 8 Lämpöpumpun hyötysuhde menoveden ja keruunesteen lämpötilojen suhteen. Laskennassa on käytetty Carnot-hyvyyskerroimenä 0,45 ja höyrystimen ja lauhduttimen asteisuutena 1 °C.

### 3 Energiakaivojen regenerointi

Energiakaivojen regeneroinnilla tarkoitetaan ympäristöönsä nähden jäähtyneen tai lämmenneen energiakaivon lämpötilan palauttamista kohti ympäröivää lämpötilaa. Tässä diplomityössä keskitytään pelkästään jäähtyneen energiakaivon regeneroimiseen. Regeneroimisella tarkoitetaan tässä työssä jäähtyneen energiakaivon lämpötilan nostamista lataamalla maankamaraan lämpöä energiakaivon kautta. Regeneroinnin lämmönlähteitä voivat olla esimerkiksi aurinko- ja ilmalämpö tai erilaiset hukkalämpövirrat, kuten rakennusten poistoilman lämmöntalteenotosta saatava lämpö. Seuraavassa käsitellään regeneroinnin tarvetta, toteutusta ja siitä saatavia hyötyjä kirjallisuuskatsauksen perusteella.

#### 3.1 Regeneroinnin tarve

Energiakaivojen regeneroinnille voi olla tarvetta tekniseltä tai taloudelliselta näkökulmalta. Regeneroinnin tarve tekniseltä näkökulmalta tarkoittaa maalämpöpumpun toimintavarmuuden heikkenemistä energiakaivokentän matalista lämpötiloista ja jäätymisriskistä johtuen. Taloudelliselta näkökulmalta tarkasteltaessa regeneroinnin avulla halutaan nostaa maalämpöpumpun höyrystymislämpötilaa ja hyötysuhdetta, mikä johtaa lämmitysjärjestelmän pienempiin käyttökustannuksiin. Molemmista tapauksista kaivokentän lämpötila on matala, mutta teknisestä näkökulmasta tarkasteltaessa niin matala, että se saattaa estää maalämpöjärjestelmän käytön.

Energiakaivojen lukumäärän ollessa pieni, yksi tai muutama energiakaivo, kallioperän sekä lämmönsiirtonesteen lämpötila pysyy yleensä vakaana vuosienkin käytön jälkeen. Kun energiakaivoja on suuri määrä samassa maalämpöjärjestelmässä, riski kallioperän ja keruunesteen lämpötilan vuosittaisesta alenemisesta kasvaa, kun energiakaivokenttää käytetään pääasiassa lämmitykseen. [19] Tähän vaikuttaa sekä energiakaivokentän nettolämpötase että kaivokentän konfiguraatio.

Huolellisesti suunnitellun energiakaivokentän lämpötilan lasku on hallittua, ja lämpötila pysyy suunnitelluissa arvoissa energiakaivokentälle lasketun käyttöiän aikana. Ensimmäisten vuosien jälkeen energiakaivokentän lämpötila tippuu melko nopeasti, mutta lämpötilan lasku hidastuu vuosien mittaan. Lopulta kaivokenttä saavuttaa stationääritilan, jossa kaivokentästä otettu lämpöenergian määrä vastaa kaivokentän ulkopuolelta kaivokenttään johtuneen energian määrää. [19]

##### 3.1.1 Nettolämpötase

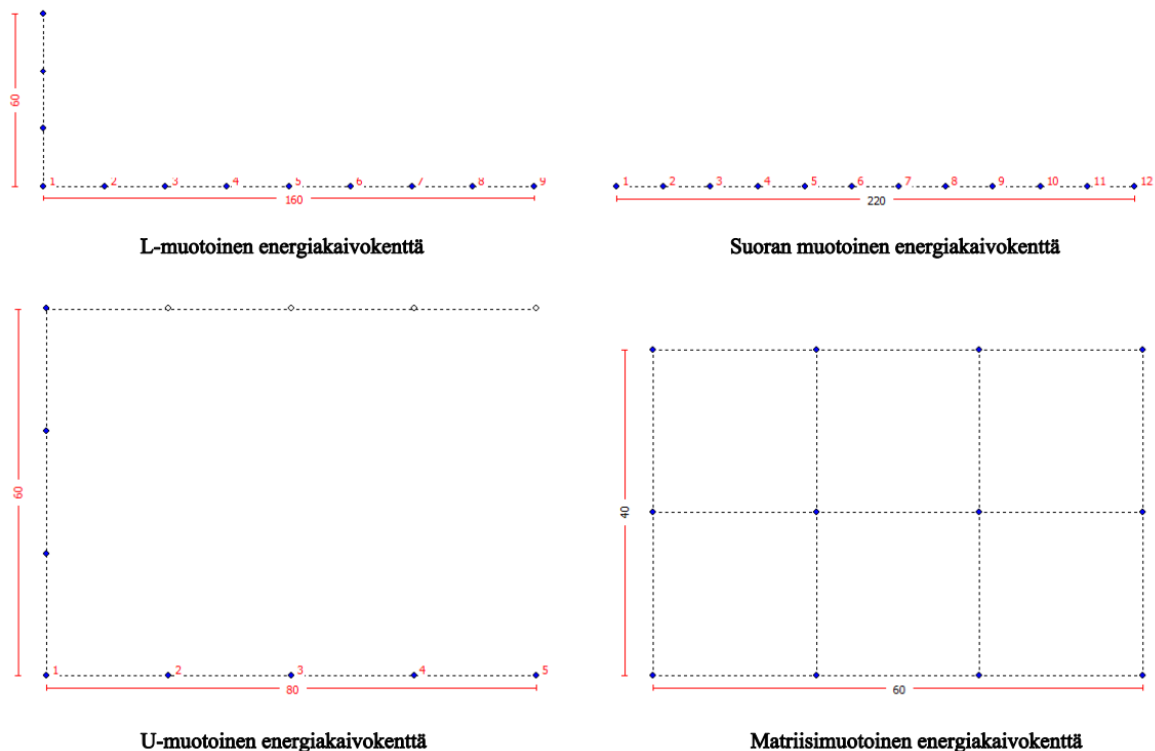
Energiakaivokenttien ja samalla maalämpöjärjestelmien suurin ongelma on kaivokentän vuotuisen nettolämpötaseen epätasapaino. Ideaalitapauksessa energiakaivokentän nettolämpötase on lähes nolla eli maankamarasta otetaan ja sinne siirretään yhtä paljon lämpöä vuoden aikana. Tällöin keruunesteen lämpötila vaihtelee vain vuoden aikojen mukaan eikä vuosivaihtelua juurikaan ole. Kylmissä ilmastoissa, kuten Suomessa, energiakaivokenttiä käytetään kuitenkin pääasiassa lämmitykseen eli maankamarasta otetaan lämpöä pois enemmän kuin sinne siirretään lämpöä (jäähdytyskäyttö). Ajan myötä energiakaivokentän lämpötila laskee, mikä laskee myös maalämpöjärjestelmän hyötysuhdetta. Nopea lämpötilan lasku heikentää maalämpöjärjestelmän kannattavuutta tai voi pahimmillaan estää koko järjestelmän käytön. [20]

Viime vuosina on tutkittu kaivokentän nettolämpötaseen epätasapainosta johtuvaa kaivokentän asteittaisen jäähtymisen/lämpenemisen vähentämisestä. Tutkimukset ovat keskittyneet pääasiassa muun muassa järjestelmien käytön ohjaukseen, hybridijärjestelmiin, energiakaivojen keskinäisten etäisyyksien kasvattamiseen, energiakaivokenttien konfiguraatioon ja energiakaivokenttien alueelliseen käyttöön. [21] Ainoastaan hybridijärjestelmät vähentävät suoraan energiakaivokentän nettolämpötaseen epätasapaino-ongelmaa. Muut ratkaisut hidastavat energiakaivokentän jäähtymistä/lämpenemistä.

### 3.1.2 Kaivokentän muodon vaikutus

Energiakaivokentän muodolla on suuri vaikutus kaivokentän lämpötilan kehitykseen. Eri muotoisilla kaivokentillä on erilainen lämpötilakehitys, vaikka kaivokenttää kuormitettaisiin yhtenäisesti. Tämä johtuu siitä, että vierekkäisten energiakaivojen termiset vaikutusalueet vaikuttavat toisiinsa ajan mittaan. Nettolämpötaseeltaan epätasapainoisen energiakaivokentän optimaalisessa muodossa energiakaivoilla on mahdollisimman vähän lämmönsiirtopinta-alaa toisiaan vasten.

Nettolämpötaseeltaan epätasapainoisen energiakaivokentän tehokkuudeltaan parhaimmat kaivokenttäkonfiguraatiot ovat muun muassa suora, L-muoto ja U-muoto (kuva 9). Lisäksi kaivojen keskinäisen etäisyyden tulee olla riittävän suuri, sillä se vaikuttaa merkittävästi energiakaivojen pitkäaikaistuottoon. Heikoin kaivokenttäkonfiguraation on tiheästi ryhmitelty matriisimuoto (kuva 9).[5]

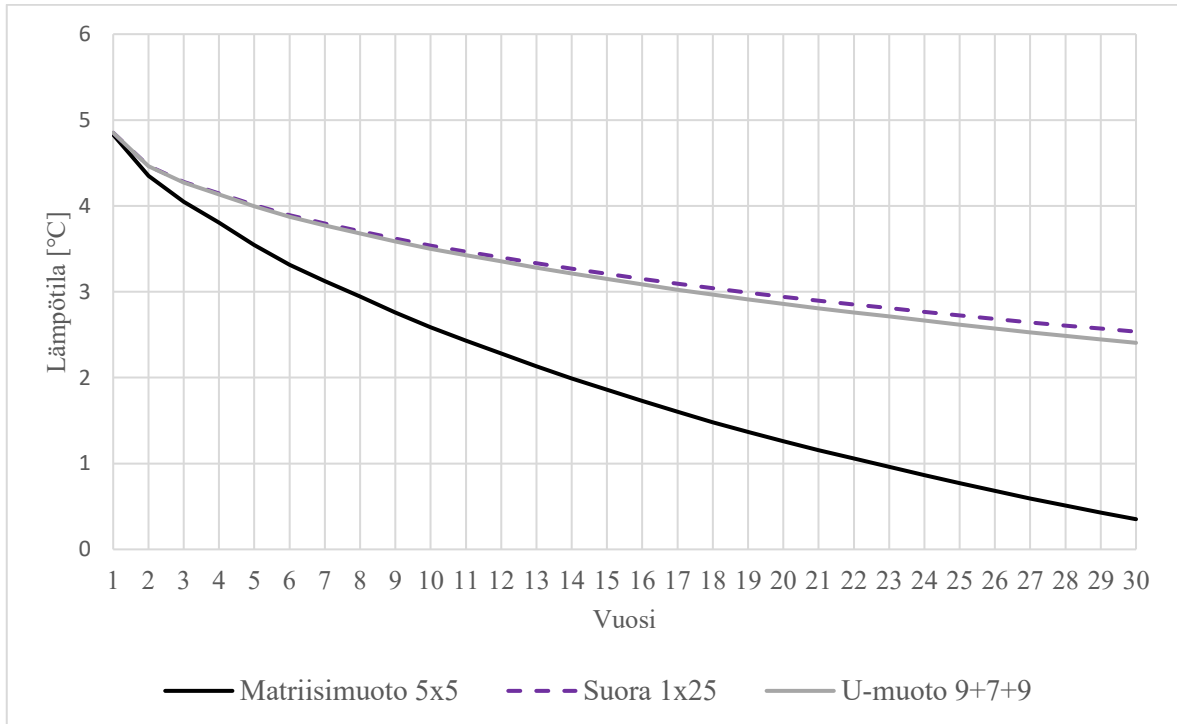


Kuva 9 Erimuotoisia energiakaivokenttiä.

Jos kaivokentän kaikkia kaivoja kuormitetaan yhtäläisesti, kaivokentän keskimmaiset energiakaivot jäähtyvät nopeammin kuin ympärillä olevat. Tämä johtuu siitä, että ympärillä olevat energiakaivot estävät kentän ulkopuolelta johtuvan lämmön pääsyn keskimmaisille kaivoille. Toisaalta maankamaran matalampi lämpötila pienentää keskimmisiä energiakaivoja



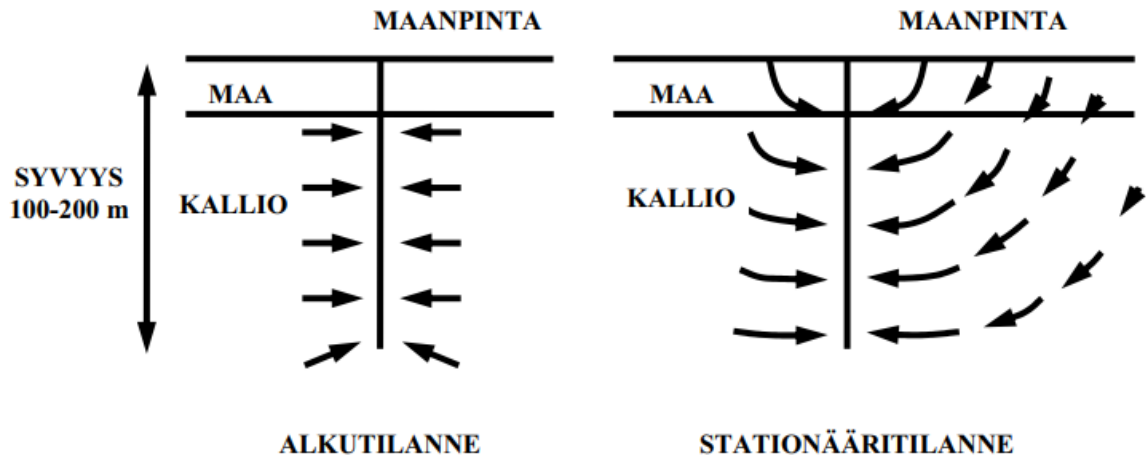
kohti olevaa lämpötilagradienttia ja pienentää niiden tuottaman lämpöenergian määrää. [22] Matriisimuotoisia kenttiä voidaan käyttää vain, kun nettolämpötase on lähes nolla.[5] Kuvassa 10 on esitetty matriisi-, suora- ja U-muotoisen kaivokentän vuotuisen keruunesteen keskilämpötilan kehitys 30 vuoden ajalta. Kuvasta nähdään hyvin kaivokentän muodon vaikutus keruunesteen lämpötilaan, ja etenkin matriisimuotoisen kentän heikkous, vaikka kaikkia kaivokenttiä on kuormitettu yhtäläisesti.



Kuva 10 Erimuotoisten 25 energiakaivon energiakenttien keruunesteen lämpötilakehitys 30 vuoden ajalta. Simuloinnissa käytettiin seuraavia lähtöarvoja; energiakaivon aktiivisyys 300 m, energiakaivojen keskinäinen etäisyys 20 m ja vuotuinen tuntikohtainen kuormitusprofiili muodostettiin TRY2012 säävyöhyke I-II tuntitason tilaston pohjalta teoreettiselle rakennukselle (rakennuksen kokonaislämpökonduktanssi 9 kW/K). Energiakaivokentän keruunesteen lämpötilakehitys simuloitiin EED:llä.

### 3.2 Energiakaivojen regeneroiminen

Energiakaivokenttä regeneroituu luonnollisesti sekä sitä voidaan regeneroida keinotekoisesti. Luonnollinen regeneroituminen voidaan jakaa kolmeen ryhmään; auringon säteilyn ja ulkoilman lämpötilan vaikutus, ympäröivän maankamaran massan ja geotermisen lämmön johtuminen sekä konvektio. [19] Lämmityskäytössä olevan energiakaivon lämpötila alkaa laskea ympäristöönsä nähden, mikä muodostaa lämpövirran ympäristöstä kohti energiakaivoa. Kuvassa 11 on kuvattu, kuinka lämpövirran suunta on aluksi radiaalisesti kohtisuoraan kalliomassasta energiakaivoon, mutta ajan kuluessa yhä suurempi osa lämpöenergiasta on peräisin maan pinnalta. [23] Claessonin ja Eskilsonin mukaan 25 käyttövuoden jälkeen 68 % lämpöenergiasta on peräisin energiakaivoa ympäröivästä maankamarasta ja loput 32 % maanpinnalta johtuvaa auringosta peräisin olevaa lämpöenergiaa. Sadan vuoden jälkeen 50 % ja tuhannen vuoden jälkeen 85 % energiakaivon lämpöenergiasta katsotaan olevan peräisin maanpinnalta johtuvaa auringon säteilyenergiaa. [24]



Kuva 11 Matalan (100-200 m) energiakaivon luonnollisen regeneroitumisen alku- ja stationääritila. Nuolet kuvaavat lämpövirran suuntaa. [7]

Maanpinnalta johtuvan aurinkoenergian merkitys on pienempi syvemmissä kaivoissa. Sen merkityksen voidaan katsoa laskevan suhteessa energiakaivon syvyyteen. Ympäröivän kalliomassan ja geotermisen lämmön johtuminen on merkittävä luonnollisen regeneroitumisen lähde, mutta sekään ei yleensä riitä pitämään kaivokentän lämpötilaa vakiona vuositasolla. Konvektiolla tapahtuvaa luonnollista regeneroitumista esiintyy pohjaveden virratessa energiakaivokentän kohdalla. Virtaava pohjavesi kuljettaa lämpöenergiaa kaivokentän ulkopuolelta. [19]

Keinotekoisien regeneroinnin lämmönlähteitä voivat olla esimerkiksi ulkoilman lämpö, aurinkolämpö, rakennuksen jäähdytyksen hukkalämpö ja erilaiset muut hukkaenergiavirrat, jotka siirretään energiakaivojen kautta kallioperään. Edellä mainittuja lämmönlähteitä voidaan käyttää energiakaivokentän lataamisen lisäksi suoraan tai välillisesti rakennuksen käyttöveden ja tilojen lämmittämiseen erilaisilla ohjausstrategioilla. Näitä voivat olla esimerkiksi maalämpöpumpun keruunesteen lämpötilan nostaminen, käyttöveden ja tuloilman suoralämmitys.

Ilmalämpöä voidaan hyödyntää energiakaivokentän regeneroimisessa, kun sen lämpötila on korkeampi kuin energiakaivokentän. Ilmalämpöä voidaan hyödyntää suoraan tai välillisesti lämmityksessä sekä ladata lämpöä energiakaivokenttään. [20] You et al. [25] tutkivat simuloimalla hybridimaalämpöjärjestelmää, jonka lisäenergianlähteenä oli ilmalämpö. Järjestelmän simulointi suoritettiin TRNSYS-simulointiohjelmalla, ja tarkastelun rakennukseksi valittiin Kiinan Harbinissa sijaitseva viisi kerroksinen hotelli. Tutkimuksen yhteenvedona You et al. toteavat, että ilmalämmön käyttö maalämpöjärjestelmän lisäenergianlähteenä voi tehokkaasti ja taloudellisesti parantaa maalämpöjärjestelmän toimintavarmuutta. Lisäksi tutkimuksessa todettiin ilmalämpöjärjestelmän olevan taloudellisesti kannattavampi vaihtoehto kuin yleisemmin käytetty aurinkolämpöjärjestelmä maalämpöjärjestelmän lisäenergianlähteenä. Tämä johtuu ilmalämpöjärjestelmän pienemmästä investointikustannuksesta. [25] Ilmalämpö käsitellään tarkemmin luvussa 3.2.

Aurinkolämmön käyttö on sopiva tapa regeneroida jäähtynyt energiakaivokenttä, ja sillä saadaan tasapainotettua energiakaivokentän nettolämpötasetta kylmässä ilmastossa. Aurinkolämpöä voidaan käyttää energiakaivokentän lataamisen lisäksi käyttöveden lämmittämiseen,

tilojen lämmittämiseen sekä maalämpöpumpun keruunesteen lämpötilan nostamiseen. Käytettäessä aurinkolämpöä myös muuhun kuin energiakaivokentän lataamiseen, regenerointi painottuu kesään. Zhu et al. [26] tutkivat aurinkolämmön vaikutusta jo olemassa olevaan maalämpöjärjestelmään Kiinan Tianjinissa, joka sijaitsee kylmässä ilmastossa. Aurinkolämpöjärjestelmää käytettiin tässä tapauksessa pelkästään energiakaivokentän lataamiseen erillisen lämminvesivaraajan kautta. Energiakaivokenttä koostuu 580:stä 120 m syvästä energiakaivosta ja aurinkokeräinjärjestelmän keräinpinta-ala on 1500 m<sup>2</sup>. Ennen aurinkolämpöjärjestelmän asentamista energiakaivokentän lämpötila laski keskimäärin 0,19 °C vuodessa ja yhden vuoden aurinkolämpöjärjestelmän käytön jälkeen keräinkentän lämpötila oli noussut 0,21 °C. Tutkimuksen mukaan maalämpöjärjestelmän vuosihyötysuhde nousi ensimmäisen aurinkolämpöjärjestelmän käyttövuoden jälkeen 3,4 % edelliseen vuoteen verrattuna. Uuden järjestelmän käyttökulut laskivat 35 % alkuperäiseen verrattuna ja aurinkolämpöjärjestelmän laskennallinen takaisinmaksuaika on noin 6,8 vuotta. [26]

Bertramin [12] tutki työnsä kirjallisuuskatsauksessa aurinko- ja maalämpöjärjestelmien yhteensovittamista käsitteleviä tutkimuksia. Johtopäätöksenä oli, että pienissä järjestelmissä aurinkolämpöjärjestelmän kytkeminen maalämpöjärjestelmän kylmäpuolelle nostaa vain maltillisesti tai merkityksettömän vähän energiakaivokentän lämpötiloja. Toisaalta suuremmissa maalämpöjärjestelmissä, lämmitystarpeen kasvaessa, aurinkolämpöjärjestelmien käyttö maalämpöjärjestelmän lisäenergialähteenä todettiin hyödylliseksi. Eräässä tutkimuksessa tutkittiin maalämpöjärjestelmän regenerointia aurinkolämmöllä. Tarkastelu suoritettiin simuloinnin avulla rakennuspinta-alaltaan 16 000 m<sup>2</sup>:een koulurakennukseen Pohjois-Amerikassa. Simuloinnin tuloksena todettiin, että energiakaivokentän porausmetrejä voidaan vähentää jopa 34 %, ja keruunesteen lämpötilatasot pysyvät silti samoina. Lisäksi tutkimuksessa huomattiin, että energiakaivojen keskietäisyyttä toisistaan voidaan pienentää regeneroitaessa energiakaivoja aurinkolämmöllä. [12] Aurinkolämpöä käsitellään tarkemmin luvussa 3.1.

### 3.3 Regeneroinnin hyödyt

Regeneroinnin suurin hyöty on lämpötilan nousu kallioperässä, ja näin ollen myös maalämpöpumpun keruunesteessä. Korkeampi keruunesteen lämpötila johtaa maalämpöpumpun korkeampiin höyrystymislämpötiloihin. Korkeampi höyrystymislämpötila parantaa maalämpöpumpun hyötysuhdetta, ja pienentää tarvittavaa ostosähkön määrää, kuten aikaisemmin todettiin kappaleessa 2.3. [27] Regeneroinnin avulla energiakaivokentän nettolämpötase voi olla parhailaan nolla, minkä ansiosta energiakaivokentän lämpötilassa ei ilmene suuria vuosivaihteluja. Näin maalämpöjärjestelmän toimintavarmuus ja hyötysuhde säilyvät ennallaan vuosikymmenienkin jälkeen. Maalämpöpumpun hyötysuhteen pysyminen korkea vuosienkin jälkeen vaikuttaa positiivisesti tarkasteltaessa järjestelmän elinkaarikustannuksia.

Lisäämällä regenerointi osaksi maalämpöjärjestelmää järjestelmän investointivaiheessa, sillä voidaan saavuttaa vähennystä tarvittavaan energiakaivokentän kokonaismetrimäärään. Tämä voi pienentää järjestelmän investointikustannuksia merkittävästi, sillä energiakaivot muodostavat suuren osan maalämpöjärjestelmän investointikustannuksista. Energiakaivojen suhteellinen osuus investointikustannuksista on suurempi isoissa järjestelmissä kuin pienissä järjestelmissä. Toisaalta regenerointijärjestelmä lisää myös investointikustannuksia, ja regeneroinnin lisäämisen taloudellisuutta tulee tarkastella aina tapauskohtaisesti.

Regeneroinnin avulla saavutettava energiakaivojen kokonaismetrimäärän vähennyksen ansiosta edellytykset maalämpöjärjestelmän asentamiseen tiheästi asutuilla ahtailla tonteilla kasvaa. Lisäksi regeneroinnin avulla energiakaivojen keskinäistä etäisyyttä voidaan pienentää, mikä parantaa entisestään maalämpöjärjestelmien asentamista ahtailla tonteilla.

Yhteenvetona voidaan todeta, että maalämpöjärjestelmän regeneroinnin avulla voidaan säästää:

- maalämpöpumpun korkeammat höyrystyslämpötilat ja hyötysuhteet
- pienemmät käyttö ja elinkaarikustannukset
- pidempi käyttöikä energiakaivokentälle
- tarvittavan kokonaisenergiakaivometrimäärän vähentämistä
- energiakaivojen keskinäisten etäisyyksien pienentämistä.

## 4 Lisäenergiälähteiden kuvaus

Seuraavassa kuvataan työssä tutkittavia maalämpöjärjestelmän rinnalla käytettäviä lisäenergiälähteitä, aurinko- ja ilmalämpöä. Lisäksi esitellään aurinkokeräinjärjestelmät (taso- ja tyhjiökeräinjärjestelmä) ja ilmalämpöjärjestelmä sekä tutkitaan niiden tuottamaa lämpöenergiaa.

### 4.1 Aurinkolämpö

Auringon säteilemä energia on peräisin auringossa jatkuvasti tapahtuvista fuusioreaktioista, joista tärkeimpänä pidetään kahden vetyatomin yhdistymistä heliumatomiksi. Aurinko koostuu useista eri kerroksista, ja sen lämpötila vaihtelee ytimen arvioidusta  $8 \cdot 10^6 - 40 \cdot 10^6$  K:stä auringon teholliseen pintalämpötilaan 5777 K:n. Auringon halkaisija on  $1,39 \cdot 10^9$  m ja sen etäisyys maapallosta on keskimäärin 150 miljoonaa kilometriä. [28]

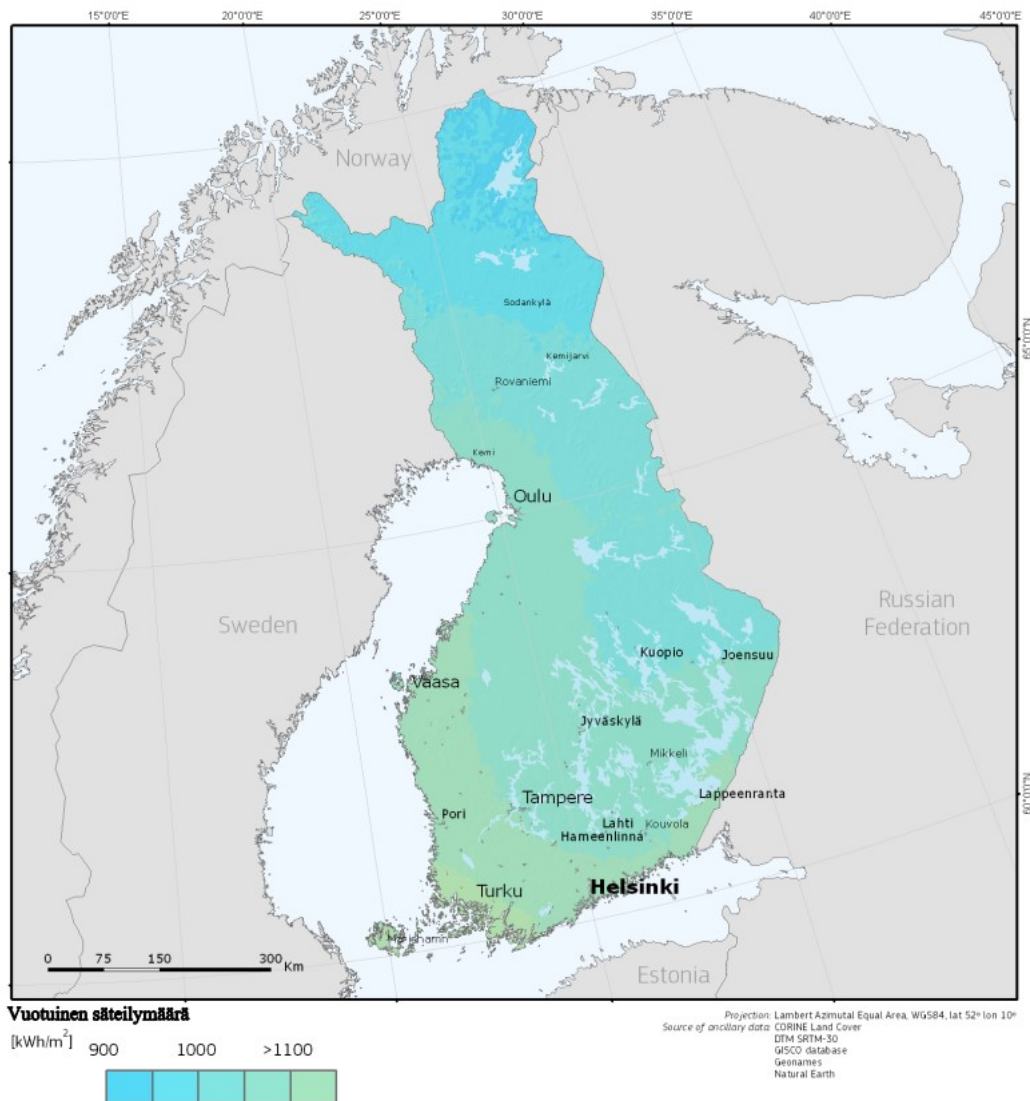
Avaruudessa maapallon ilmakehän ulkopuolella auringon säteilyn teho vaihtelee auringon ja maapallon etäisyyden mukaan arviolta välillä  $1350-1390 \text{ W/m}^2$ . Tätä säteilytehoa kutsutaan aurinkovakioksi. Säteilyn osuessa maapallon ilmakehään osa säteilystä heijastuu takaisin avaruuteen, ja parhaimmillaan noin  $1000 \text{ W/m}^2$  säteilyteho osuu maanpinnalle. [29]

#### 4.1.1 Auringon säteily Suomessa

Auringon kokonaissäteilyn määrä vaihtelee alueen ja ajan mukaan. Suomessa säteily vaihtelee voimakkaasti vuodenaikojen mukaan. Aurinkoenergiaa hyödyntävissä prosesseissa on tärkeää tietää alueen keskimääräinen kokonaissäteily. Säteilyn intensiteettiä voidaan arvioida teoreettisilla laskelmilla, paikallisella mittauksella tai tilastotietoja käyttämällä. [2]

Auringosta saatavan energian määrään vaikuttavat merkittävästi aurinkokeräimen sijainti sekä suunta- ja kallistuskulma. Aurinkokeräimen tulisi sijaita niin, että siihen osuu mahdollisimman vähän varjoja. Yleisesti paras paikka on rakennusten katolla. Energiamäärän kannalta aurinkokeräimen optimaalisin suuntaus on etelään. Keräin voidaan kuitenkin asentaa idän ja lännen väliseen suuntaan, eikä tällä ole merkittävää vaikutusta aurinkokeräimen vuosituotolle. Etelän suunnasta  $\pm 45^\circ$  poikkeavien keräinten vuosituotto on hieman alle seitsemän prosenttia pienempi kuin etelään suunnatun keräimen vuosituotto. Suuntaamalla keräin enemmän itään, voidaan painottaa keräimen energiantuotanto huippu aamuun, ja suuntaamalla enemmän länteen on painottuu energiantuotanto iltaan. Aurinkokeräimen paras tuotto saadaan, kun auringon säteily osuu kohtisuoraan keräimen pintaa vasten. Suomessa kiinteäasenteisen aurinkokeräimen optimaalisin kallistuskulma vuosituoton maksimoinnille on keskimäärin  $45^\circ$ . Yleisesti voidaan sanoa, että optimaalisin kallistuskulma vuosituotannon maksimoimiseksi on leveysaste  $-20^\circ$ . Talviaikaan optimaalinen kallistuskulma on melkein  $90^\circ$  ja kesäaikaan vähemmän kuin  $45^\circ$  astetta. [29]

Etelä-Suomessa auringon säteilyenergian määrä neliometriä kohden on noin 1100 kWh vuodessa ja Pohjois-Suomessa noin 900 kWh vuodessa optimiasennossa olevalle keräimelle. Kuvassa 12 on esitetty koko Suomen säteilyenergian määrä vuositasolla optimiasentoiselle aurinkokeräimelle. [29]



Kuva 12 Auringon vuotuinen säteily määrä alueittain Suomessa. Muokattu [30]

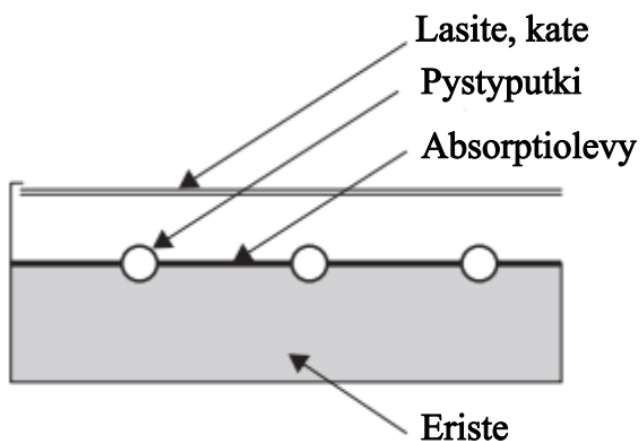
Auringon kokonaissäteily aurinkokeräimen pinnalle koostuu kolmesta komponentista: suorasäteilystä, hajasäteilystä ja heijastuneesta säteilystä. Suorasäteily kuvaa suoraan auringosta pinnalle tulevaa säteilyä. Hajasäteilyllä tarkoitetaan säteilyä, joka on siroutunut ilmakehässä ja muuttanut suuntaa. Heijastunut säteily on maasta heijastunutta suora- ja hajasäteilyä. Pinnalle kohdistuvan säteilyn intensiteettiin vaikuttavat pääasiassa auringon asema ja pinnan suuntaus. [2]

#### 4.1.2 Aurinkokeräimet – taso- ja tyhjiöputkikeräin

Aurinkokeräin on laite, joka kerää lämpöenergiaa absorboimalla auringon säteilyä. Kerätty lämpöenergia siirretään virtaavan fluidin välityksellä sinne, missä sitä tarvitaan. Yleisesti aurinkokeräimet luokitellaan ei jäljittäviin ja jäljittäviin keräimiin. Ei jäljittävät aurinkokeräimet asennetaan kiinteästi tiettyyn ilmansuuntaa ja kallistuskulmaan. Jäljittävä aurinkokeräin seuraa päivän aikana aurinko niin, että auringon säteily osuisi aina kohtisuoraan keräimen pintaan. Jäljittävä aurinkokeräin voidaan vielä luokitella yksi- ja kaksi aksiaalisiin jäljittäviin keräimiin sen mukaan seuraako keräin aurinkoa ainoastaan ilmansuunnan mukaan vai lisäksi auringon säteilyn tulokulman mukaan. [31]

Aurinkokeräimien työaineena toimii neste tai kaasu. Tyypillisesti keruunesteenä on vesi, jolla on hyvät lämmönsiirto-ominaisuudet, ja kaasuna ilma. Ilmastoissa, joissa ulkoilman lämpötila laskee nollan alapuolella, käytetään keruunesteenä tavallisesti vesi-propyleeniglykoli seosta. Seoksen avulla saadaan laskettu keruunesteen jäätymispiste tarvittavan alhaiseksi. Seoksen kiehumispiste on hieman korkeampi sekä lämmönsiirtokyky ja pumpattavuus hieman huonommat veteen verrattuna. Nestekiertoiset aurinkokeräinjärjestelmät voidaan vielä luokitella aktiivisiksi ja passiivisiksi järjestelmiksi. Aktiivisessa järjestelmässä nestettä kierrätetään kiertovesipumpun avulla, ja passiivisessa järjestelmässä neste virtaa luonnollisen konvektion seurauksena. [29,31]

Tasokeräin on yksi tyypillinen ei jäljittävä keräin ja käytetyin kaikista aurinkokeräimistä. Kuvassa 13 on esitetty tyypillinen tasokeräin. Tasokeräimen pääkomponentit ovat läpinäkyvä katelasi, absorptiolevy, lämmönkeruuputket, eriste ja runko. Auringon säteilyn ohittaessa katelasin ne osuvat hyvin absorboivaan absorptiolevyyn, joka lämpenee. Absorptiolevystä lämpö siirtyy lämmönsiirtoputkiston lämmönsiirtonesteeseen, joka kuljettaa lämmön lämminvesivaraajaan tai käyttöön. Rinnakkaiset lämmönsiirtoputket voivat olla hitsattu absorptiolevyyn tai olla kiinteä osa absorptiolevyä. Tasokeräimen lämmönsiirtoputket ovat yleensä yhdistetty keräimen päistä jakotukilla halkaisijaltaan isompiin meno- ja paluurunkoputkiin, jotka yhdistävät aurinkokeräimet toisiinsa. Keräimen lämmönsiirtoputki voi olla myös yhtenäinen, päistään U-lenkillä yhdistetty putki. Yhtenäisen lämmönsiirtoputken haittapuolena on suuremmat painehäviöt. [32]



Kuva 13 Tyypillisen nestekiertoisen tasokeräimen poikkileikkaus. Muokattu [32]

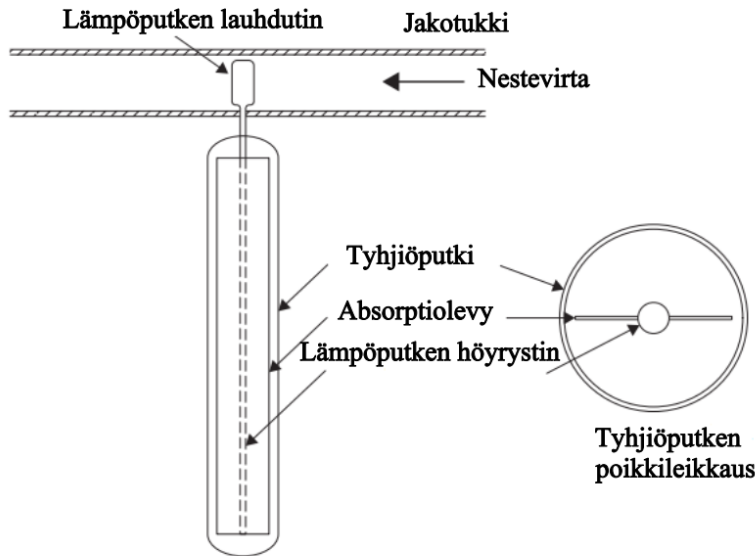
Tasokeräimen katteen tehtävänä on päästää mahdollisimman paljon auringon säteilyä läpi, ja pitää keräimen lämpöhäviöt katelasin kautta ympäristöön mahdollisimman pienenä muodostamalla absorptiolevyn ja katteen väliin liikkumaton ilmakerros. Lisäksi kate suojaa keräimen muita komponentteja säältä. Tasokeräimien katteena käytetään yleensä selektiivistä lasia, jonka rautapitoisuus on pieni. Selektiivilasi läpäisee noin 85 - 90 % tulevasta lyhytaaltoisesta (0,3-3  $\mu\text{m}$ ) auringon säteilystä, eikä käytännössä päästä lävitseen absorptiolevyn emittoivaa pitkäaaltoista (5-50  $\mu\text{m}$ ) säteilyä. Katelasin likaisuudella tai pölyisyydellä ei katsota olevan merkittävää vaikutusta auringon säteen läpäisevyyteen. Luonnollisen sateen puhdistaman katelasin auringon säteilyn läpäisevyys on noin 2-4 % prosenttia maksimiarvosta. Vaikka katelasi ei juurikaan läpäise absorptiolevyn emittoimaa pitkäaaltoista säteilyä, pieni osa tästä säteilystä absorboituu lasiin. Tämä nostaa lasin lämpötilaa ja lisää keräimen lämpöhäviöitä ympäristöön. [32]

Absorptiokeräinlevyn tehtävänä on absorboida mahdollisimman paljon siihen osuvaa auringon säteilyä ja luovuttaa mahdollisimman vähän lämpöä yläpuolella olevaan ympäristöön sekä alapuolella olevaan rakenteeseen. Absorptiokeräinlevy siirtää kerätyn lämmön lämmönsiirtonesteeseen. Maksimoidakseen kerätyn energian määrän tulee absorptiokeräinlevyn pinnan olla hyvin absorboiva auringon säteilyn lyhyille aallonpituuksille ja pinnoitteella täytyy olla pieni emissiivisyys pitkäaaltoiselle säteilylle. Tämän tapaisia pinnoitteita kutsutaan selektiivisiksi pinnoitteiksi. Keräinlevyn absorbointikyky riippuu pinnoitteen laadusta ja väristä sekä keräimen kallistuskulmasta. Yleisin absorptiolevyn väri on musta. Sopivalla pinnoitteen elektrolyyttisellä tai kemikaalisella käsittelyllä absorptiokeräinlevyn absorbointikyky saadaan erittäin korkeaksi ja pitkäaaltoinen emissiivisyys pieneksi. Kaupallisten absorptiolevyjen pinnoitusmenetelmiä ovat muun muassa elektrolyyttinen pinnoitus, maalaus selektiivisellä maalilla ja anodisointi. Selektiivipinnoitteet ovat erityisen tärkeitä sellaisissa ympäristöissä, joissa keräimen pintalämpötila on huomattavasti korkeampi kuin ympäristön lämpötila. Kehitettyjä selektiivisiä pinnoitteita on lukuisia erilaisia, mutta yleisin käytössä oleva pinnoite on mustakromi. [32]

Tyhjiöputkikeräin on toinen tyypillinen ei jäljittävä keräin ja markkinoilla on useita eri malleja tyhjiöputkikeräimistä. Tyhjiöputkikeräin toimii paremmin kylmässä, pilvisessä ja tuulisessa säässä kuin tasokeräin. Lämpöputken ja lasiputken välissä oleva tyhjiö toimii tehokkaana eristeenä, ja pienentää konvektio- ja johtumislämpöhäviöitä. Tyhjiön ilmanpaine voi olla todella pieni, vain 0,00001 millibaaria. Tämä mahdollistaa tyhjiöputken toimimaan korkeammissa lämpötiloissa kuin tasokeräimen. [29,32]

Tyypillinen tyhjiöputkikeräin koostuu selektiivisestä lasista valmistetusta tyhjiöputkista, joiden sisällä on lämpöputki. Kuvassa 14 on esitetty tyypillinen tyhjiöputken rakenne. Todeellinen tyhjiöputkikeräin koostuu useasta tyhjiöputkesta jotka ovat yhdistetty toisiinsa jakotukilla. Lämpöputki koostuu suljetusta kupariputkesta, joka on yhdistetty absorptiolevyyn. Lämpöputken yläpäässä sijaitsee lauhdutin, joka on tyhjiöputken ulkopuolella jakotukin sisällä. Tyhjiöputken toimintaperiaate perustuu lämpöputken sisällä olevan nesteen, esimerkiksi metanolin, latenttienergian hyödyntämiseen eli höyrystymis-kondensoitumis-sykliin. Absorboidun aurinkoenergian vaikutuksesta neste höyrystyy ja nousee lämpöputken lauhduttimelle. Lauhduttimelta höyry kondensoituu ja vapautuva lämpöenergia siirtyy jakotukin sisällä virtaavaan lämmönkeruunesteeseen. Lämpöputken sisällä kondensoitunut neste valuu takaisin lämpöputken pohjalle, josta prosessi jatkuu uudelleen. [32]





Kuva 14 Tyhjiöputkikeräin sekä tyhjiöputkikeräimen poikkileikkaus. [32]

Toisenlaisessa tyhjiöputkikeräinmallissa tyhjiöputki koostuu kahdesta lasiputkesta, ja lasiputkien välissä on tyhjiö. Sisempi lasiputki on pinnoitettu absorptiopinnoitteella ja sen sisäpuolella kiertää lämmönkeruuneste U-putkessa tai koaksiaaliputkessa. Tämän rakenteen etuina ovat halvemmat valmistuskustannukset ja pienempi vuotavuus kuin yhden lasin tyhjiöputkessa. Haittapuolina ovat, että järjestelmää ei voida tyhjentää lämmönkeruunesteestä, ja että yhden tyhjiöputken rikkoutuessa järjestelmän lämmönkeruuneste voi vuotaa ulos järjestelmästä lähes kokonaan. [32]

Lisäksi tyhjiöputkikeräimien tehokkuutta voidaan parantaa asettamalla tyhjiöputkien taakse tasomainen tai jokaisen putken kohdalle parabolinen heijastava pinta. Heijastavan pinnan avulla tyhjiöputkeen saadaan kohdistettua enemmän auringon säteilyä.[32]

Taulukossa 1 on esitetty erimallisten aurinkokeräinten tyypillisiä kokonaislämpöhäviökerroimia, heijastavuus-absorptio-kerroin sekä operointilämpötila-alueet.

Taulukko 1 Tyhjiökeräimen ja 1-lasisen tasokeräimen teknisiä ominaisuuksia. [32]

Keräintyyppi	Kokonaislämpöhäviökerroin ( $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$ )	Optiset häviöt $\tau_a$ (-)	Operointilämpötila ( $^{\circ}\text{C}$ )
1-lasinen tasokeräin	3-4,5	0,7-0,85	30-80
Tyhjiökeräin	1-2,5	0,5-0,75	50-200

#### 4.1.3 Aurinkokeräinten tehokkuuteen vaikuttavat tekijät

Aurinkokeräinten tehokkuuteen vaikuttavat aurinkokeräimessä tapahtuvat optiset häviöt ja lämpöhäviöt absorboitaessa auringon säteilyä lämpöenergiaksi.

Optisia häviöitä tapahtuu keräimen suojalasissa ja absorptiopinnalla. Näitä häviöitä ovat heijastavuus, läpäisevyys ja absorptio. Optiset häviöt riippuvat tulevasta säteilystä sekä keräimen materiaalien ominaisuuksista kuten paksuudesta, valontaitekerroimesta ja ekstinktiokerroimesta, joka kuvaa säteilyn absorboitumiskykyä materiaaliin.

Laskettaessa keräimen tuottamaa lämpöenergiaa, optiset häviöt huomioidaan seuraavalla yhtälöllä (11)

$$Q_{opt.häviöt} = \tau\alpha, \quad (11)$$

missä

$\tau$  on suojalasin läpäisevyyskerroin [-]  
 $\alpha$  on absorbaattorin absorptiokerroin [-]

Kerointa  $\tau\alpha$  kutsutaan teholliseksi läpäisevyys-absorptio tuotteeksi ja se on dimensioton. Kerroin on yksilöllinen erilaisille keräimille, ja se täytyy määrittää mittaamalla.

Aurinkokeräimessä tapahtuu lämpöhäviöitä johtumalla, konvektiolla ja säteilyllä. Yksinkertaistettuna koko keräimen lämpöhäviö voidaan esittää yhtälöllä (12)

$$Q_{häviöt} = U_L A_c (T_p - T_y), \quad (12)$$

missä

$U_L$  on kokonaislämpöhäviökerroin [ $W/(Km^2)$ ]  
 $A_c$  on keräimen pinta-ala [ $m^2$ ]  
 $T_p$  on absorptiotason lämpötila [ $^{\circ}C$ ]  
 $T_y$  on ympäristön lämpötila [ $^{\circ}C$ ]

Kokonaislämpöhäviökerroin  $U_L$  riippuu keräimen rakenteesta, rakennemateriaalien ominaisuuksista sekä toimintaolosuhteista ja se on lämmönsiirtovastus absorptiolevyn ja ympäristön ilman välillä.  $U_L$  voidaan esittää yhtälöllä (13)

$$U_L = U_t + U_b + U_e, \quad (13)$$

missä

$U_t$  on keräimen yläosan lämpöhäviökerroin [ $W/(Km^2)$ ]  
 $U_b$  on keräimen alaosan lämpöhäviökerroin [ $W/(Km^2)$ ]  
 $U_e$  on keräimen reunojen lämpöhäviökerroin [ $W/(Km^2)$ ]

Keräimen yläosasta eli katelasista lämpöhäviöitä tapahtuu konvektiolla ympäristön ilmaan ja säteilemällä taivaalle. Tuuli lisää keräimen yläosasta tapahtuvaa konvektiivista lämpöhäviötä. Yläosan lämpöhäviöitä pyritään pienentämään selektiivilasilla tai moninkertaisilla lasilla. Keräimen pohjan lämpöhäviöissä, lämpöenergia johtuu aluksi eristeen läpi keräimen pinnalle, josta se siirtyy konvektiolla ympäröivään ilmaan. Alaosan lämpöhäviöt ovat yleensä alle 10 % yläosan lämpöhäviöistä. [32]

Optisten häviöiden ja lämpöhäviöiden avulla voidaan määrittää aurinkokeräimen tuottama lämpöteho stationääritilassa seuraavalla yhtälöllä (14)

$$Q_u = A_c [G_t(\tau\alpha) - U_L(T_p - T_a)] = \dot{m}c_p[T_{out} - T_{in}], \quad (14)$$

missä

$Q_u$	on aurinkokeräimen tuottama lämpöteho [W]
$G_t$	on auringon säteilyteho keräimen pinnalle [ $W/m^2$ ]
$\dot{m}$	on keruunesteen massavirta [ $kg/s$ ]
$c_p$	on keruunesteen ominaislämpökapasiteetti [ $J/(kgK)$ ]
$T_{out}$	on keruunesteen paluulämpötila [ $^{\circ}C$ ]
$T_{in}$	on keruunesteen menolämpötila [ $^{\circ}C$ ]

Aurinkokeräimien tuottaman lämpötehon laskeminen on kuitenkin mielekkäämpää käyttämällä keruunesteen menolämpötilaa yhtälössä absorptiotason lämpötilan sijaan. Tätä varten tarvitaan lämmönpoistokerroin  $F_R$ , joka edustaa todellista käytettävissä olevaa hyötysuhdetta, jos keräimen absorptiopinnan lämpötila on ollut sama kuin keruunesteen paikallinen lämpötila. Lämmönpoistokerroin on yksilöllinen erilaisille keräimille, ja se täytyy määrittää mittaamalla. Aurinkokeräimen tuottama lämpöteho voidaan laskea seuraavalla yhtälöllä (15) kun absorptiopinnan lämpötila vaihdetaan keruunesteen menolämpötilaan ja yhtälöön lisätään lämmönpoistokerroin. Yhtälö tunnetaan Hottel-Whillier-Bliss (HWB) yhtälönä.

$$Q_u = A_c F_R [G_t(\tau\alpha) - U_L(T_i - T_a)] = \dot{m}c_p[T_o - T_i], \quad (15)$$

missä

$F_R$	on aurinkokeräimen lämmönpoistokerroin [—]
-------	--

Kaupallisille aurinkokeräimille määritetään yleensä hyötysuhdeparametrit  $n_0$ ,  $a_1$  ja  $a_2$ , joiden avulla voidaan laskea aurinkokeräimen tuottama lämpöenergia staattisessa tilanteessa yhtälöllä (16). Lisäksi tarvitaan auringon säteilyn teho, ulkoilman lämpötila ja keräimen keskimääräinen lämpötila. [29]

$$Q_u = A_c [n_0 G_t - a_1(T_p - T_a) - a_2(T_p - T_a)^2], \quad (16)$$

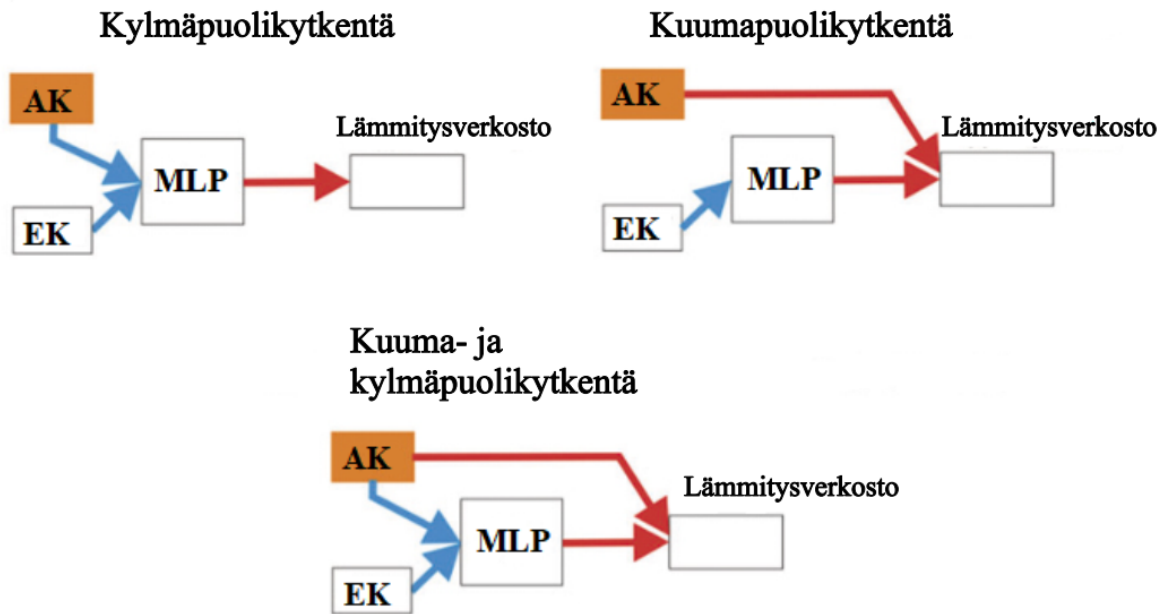
missä

$n_0$	on lämpöhäviötön hyötysuhde [—]
$a_1$	on ensimmäisen kertaluokan lämpöhäviökerroin [ $W/(m^2K)$ ]
$a_2$	on toisen kertaluokan lämpöhäviökerroin [ $W/(m^2K^2)$ ]

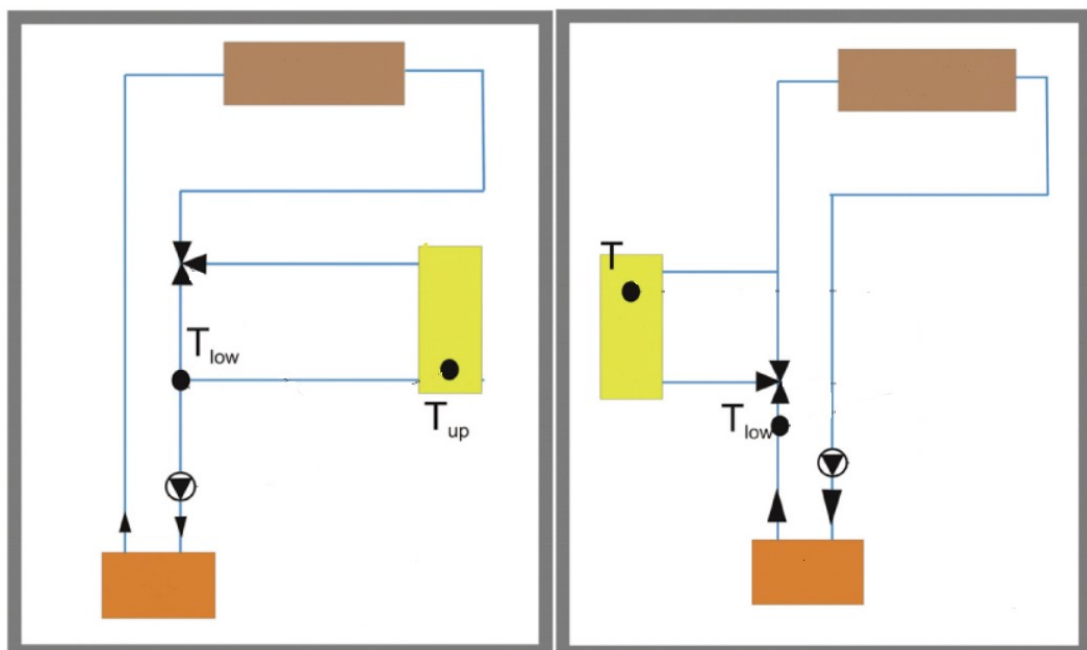
#### 4.1.4 Aurinkolämpöjärjestelmä lisäenergialähteenä maalämpöjärjestelmän rinnalla

Aurinkolämpöjärjestelmä voidaan kytkeä eri tavoin lisäenergialähteeksi maalämpöjärjestelmän rinnalle. Aurinkolämpöjärjestelmän kytkentätapa voidaan luokitella esimerkiksi kylmä- (maalämpöpumpun höyrystinpuoli) ja kuumapuolikytkentään (maalämpöjärjestelmän lauhdutinpuoli). Aurinkolämpöjärjestelmä voi olla kytkettynä kylmälle tai kuumalle puolelle sekä molemmille puolille, kuten kuvassa 15 on esitetty. Kytkettäessä aurinkolämpöjärjestelmä kylmäpuolelle, aurinkolämpö siirretään maalämpöpumpun keruunesteeseen, ja sillä

regeneroidaan energiakaivoja tai nostetaan keruunesteen sisäänmenolämpötilaa (kuva 16). Kuumapuolen kytkennässä aurinkolämpöjärjestelmä toimii itsenäisesti erillään maalämpöjärjestelmästä, ja aurinkolämmöllä tuotetaan osa lämpöenergian tarpeesta. Kylmä- ja kuumapuolikytkennässä osa lämpöenergian tarpeesta tuotetaan suoraan aurinkokeräimillä ja ylimääräisellä aurinkolämmöllä esimerkiksi regeneroidaan energiakaivoja. [12] Tässä diplomityössä tarkastellaan vain aurinkolämpöjärjestelmän kylmäpuolikytkentää.



Kuva 15 Aurinkolämpöjärjestelmän kytkentävaihtoehdot maalämpöjärjestelmän rinnalle (AK; aurinkokeräin, EK; energiakaivo ja MLP; maalämpöpumppu). Muokattu [12]



Kuva 16 Aurinkokeräimen kytkentöjä maalämpöpumpun kylmäpuolelle; keruunesteen lämpötilan suora nostaminen (vasemmanpuoleinen kytkentä) ja energiakaivojen lataaminen (oikeanpuoleinen kytkentä). Muokattu [12]

## 4.2 Ilmalämpö

Ilmalämpö on ulkoilmaan sitoutunutta auringosta peräisin olevaa lämpöenergiaa. Ulkoilma sisältää myös vesihöyryä ja tällöin puhutaan kosteasta ilmasta. Ulkoilman sisältämä lämpöenergia voidaan jakaa kahteen osaan; tuntuvaan ja latenttiin lämpöenergiaan. Tuntuva lämpö tarkoittaa kuivan ilman sisältämää lämpöenergiaa. Latentti lämpö tarkoittaa ulkoilmassa olevan vesihöyryn sisältämää energiaa, joka voi olla hyvin merkittävä tarkasteltaessa ulkoilman energiasisältöä. Ilman sisältämä kokonaislämpösisältö voidaan laskea yhtälöllä (17), kun tiedetään ilman lämpötila ja kosteus. [5]

$$h_{ilma} = c_{pi}t + x(c_{ph}t + l_{v,0}), \quad (17)$$

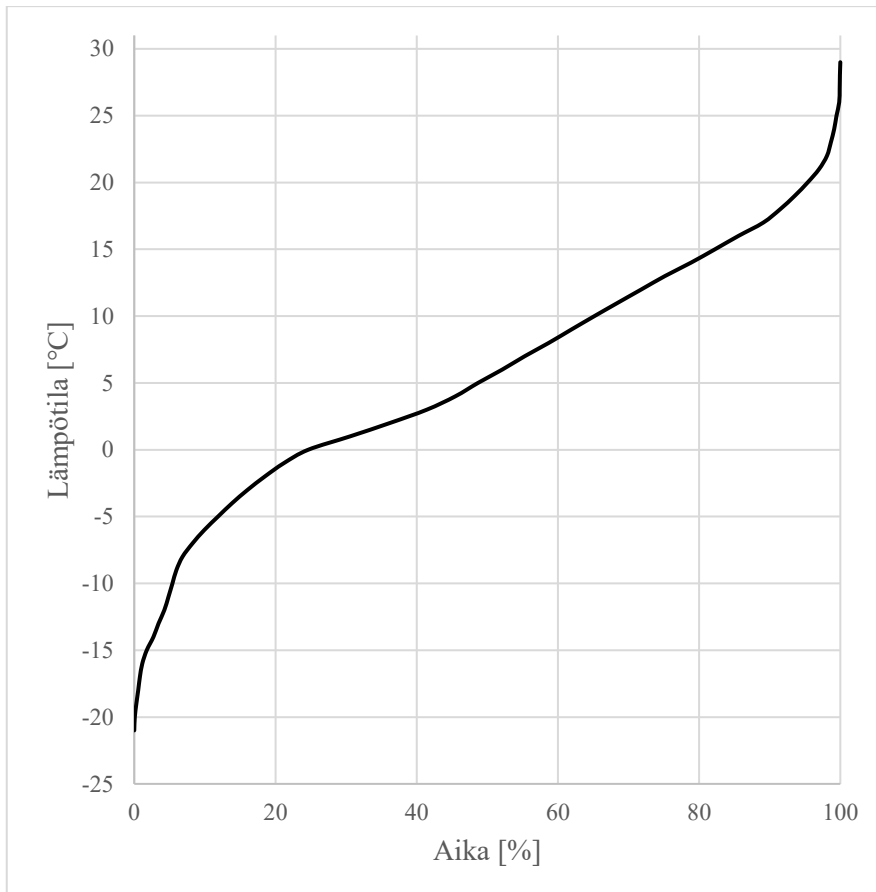
missä	
$h_{ilma}$	on ilman entalpia [ $\text{kJ/kg}$ ]
$c_{pi}$	on ilman ominaislämpökapasiteetti [ $\text{kJ/(kgK)}$ ]
$c_{ph}$	on vesihöyryn ominaislämpökapasiteetti [ $\text{kJ/(kgK)}$ ]
$t$	on ilman lämpötila [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$x$	on ilman absoluuttinen kosteus [ $\text{kg/kg}_{ki}$ ]
$l_{v,0}$	on vesihöyryn latenttilämpö referenssilämpötilassa $0^{\circ}\text{C}$ ( $=2501$ ) [ $\text{kJ/kg}$ ]

Hyödynnettäessä ilmalämpöä lisäenergiälähteenä, sen etuna muihin lämmönlähteisiin voidaan pitää ulkoilman käytännössä loputonta saatavuutta. Toisaalta huonona puolena voidaan pitää ulkoilman lämpötilan, ja näin ollen energiasisällön, suurta vaihtelevuutta ajan mukaan ja etenkin sitä, että ulkoilman lämpötila on matalimmillaan lämmitystarpeen ollessa suurimmillaan. Lisäksi ilman kosteus saattaa aiheuttaa jäätymistä lämmönvaihtimen pinnalle. Tämän vuoksi kylmän ilmastoin ilmalämpöpumppujen ulkoyksiköissä on sulatustoiminto. Myös maalämpöjärjestelmän keruuneste voi olla alle  $0^{\circ}\text{C}$ , ja aiheuttaa jäätymisriskin lämmönvaihtimella. Lämmönvaihtimen jäätyminen tulee estää oikeanlaisella ohjauksella.

### 4.2.1 Ulkoilman lämpötilan pysyvyysarvot ja testivuoden lämpötilat Suomessa

Hyödynnettäessä ulkoilman lämpötilaa maalämpöjärjestelmän lisäenergiälähteenä on tärkeä tietää ulkoilman lämpötila vuoden aikana. Ulkoilman lämpötila vuoden aikana voidaan esittää säävyöhykkeittäin, joko lämpötilan pysyvyysarvoina tai tuntikohtaisena lämpötilana. Rakennusten energialaskennassa ulkolämpötilan pysyvyysarvot ja tuntikohtainen lämpötila perustuvat energialaskennan testivuoteen (TRY2012).

Ulkoilman lämpötilan pysyvyysarvot kuvaavat, kuinka suuren osan ajasta ulkoilman lämpötila on tietyn lämpötilan ala tai yläpuolella. Ilmatieteenlaitoksen tarjoamassa aineistoissa pysyvyysarvot on annettu säävyöhykkeittäin kuukausi-, puolivuosi- ja vuositasolla. Ulkoilman lämpötilan pysyvyyskäyrä on alku- ja loppupäästä terävä, koska ääriämpötiloja esiintyy harvoin. Kuvassa 17 on esitetty säävyöhykkeiden I-II (Vantaa) ulkoilman lämpötilan pysyvyyskäyrä.



Kuva 17 Ulkoilman lämpötilan pysyvyyskäyrä säävyöhykkeillä I-II.

Energialaskennan testivuoden aineistossa on myös ulkoilman tuntikohtainen lämpötila säävyöhykkeittäin. Tuntikohtaisen ulkoilman lämpötilan avulla voidaan ilmalämpöjärjestelmän tuottamaa lisäenergiaa tarkastella tuntitasolla, minkä ansiosta järjestelmällä tuotetun lisäenergian tarkastelu on huomattavasti tarkemmalla tasolla.

Tyypillisen Etelä-Suomessa sijaitsevan 300 m syvän energiakaivon häiriöttömän lämpötilan voidaan arvioida olevan noin + 8-9 °C:ta kohdassa 2.2.1 esitettyjen tietojen perusteella. Energiakaivokentän nettolämpötaseen ollessa merkittävästi negatiivinen, kaivokentän lämpötila laskee melko nopeasti ensimmäisten vuosien aikana ja lasku hidastuu vuosien myötä. Tarkasteltaessa kuvan 17 ulkoilman lämpötilan pysyvyyskäyrää voidaan havaita, että ulkoilman lämpötila on vuoden aikana säävyöhykkeellä I-II noin puolet ajasta korkeampi kuin + 5 °C:ta. Näin ollen, jos energiakaivokentän keruunesteen lämpötilan on kevään ja syksyn välillä keskimäärin  $\leq + 5$  °C:ta, voidaan teoreettisesti ulkoilman sisältämää lämpöenergiaa hyödyntää energiakaivojen regeneroimisessa tai keruunesteen lämpötilan nostamisessa noin 50 %:n ajan vuodesta.

#### 4.2.2 Ilma-neste-lämmönvaihtimen teho

Ilmasta saatavaan lämpötehoon vaikuttaa lämmönvaihtimen ominaisuudet, ilman lämpötila, kosteus ja tilavuusvirta sekä lämmönsiirtonesteen lämpötila, ominaislämpökapasiteetti ja tilavuusvirta. Ideaalitapauksessa, kun vaihtimella tapahtuvia häviöitä ei huomioida, ilma-neste-lämmönvaihtimen lämpöteho ja energiatase voidaan kirjoittaa seuraavalla yhtälöllä (18)

$$\phi_{ilma} = \rho_i q_{vi} (h_{tulo,i} - h_{lähtö,i}) = \rho_f q_{vf} c_{pf} (T_{tulo,f} - T_{lähtö,f}), \quad (18)$$

missä

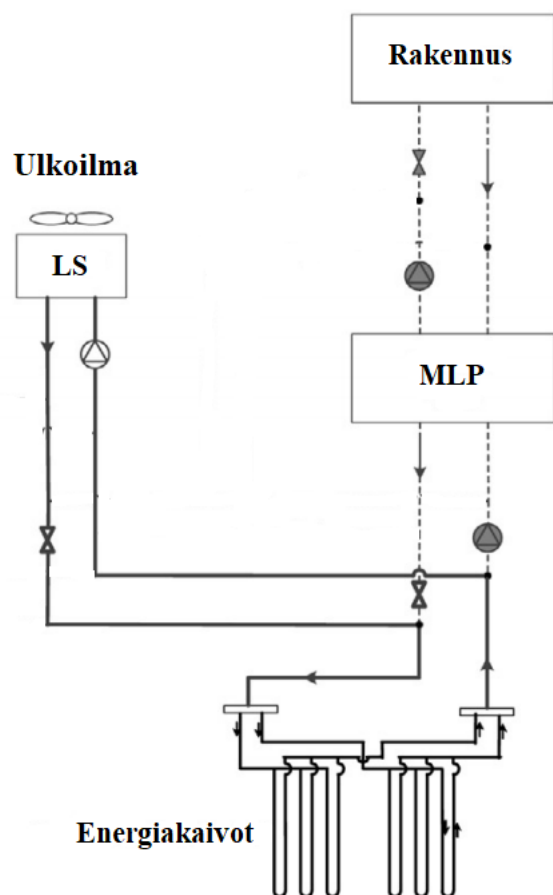
$\phi_{ilma}$	on ilman kokonaisteho [W]
$\rho_i$	on ilman tiheys [ $kg/m^3$ ]
$q_{vi}$	on ilman tilavuusvirta [ $m^3/s$ ]
$h_{tulo,i}$	on tuloilman entalpia [ $kJ/kg$ ]
$h_{lähtö,i}$	on lähtevän ilman entalpia [ $kJ/kg$ ]
$\rho_f$	on keruunesteen tiheys [ $kg/m^3$ ]
$q_{vf}$	on keruunesteen tilavuusvirta [ $m^3/s$ ]
$c_{pf}$	on keruunesteen ominaislämpökapasiteetti [ $kJ/(kgK)$ ]
$T_{tulo,f}$	on keruunesteen tulolämpötila [ $^{\circ}C$ ]
$T_{lähtö,f}$	on keruunesteen lähtölämpötila [ $^{\circ}C$ ]

Todellisuudessa lämmönvaihtimella tapahtuu lämpöhäviöitä, eikä kaikkea ulkoilman sisältämää lämpöenergiaa saada talteen.

#### 4.2.3 Ilma-neste-lämmönvaihtimen kytkentä maalämpöjärjestelmän rinnalle

Hyödynnettäessä ulkoilman sisältämää energiaa lisäenergialähteenä maalämpöjärjestelmän rinnalla tarvitaan maalämpöjärjestelmän ja ulkoilman välille ilma-neste-lämmönvaihdin. Lämmönvaihtimena voidaan käyttää esimerkiksi puhaltimella varustettua nestelauhdutinta. Siirrettäessä ulkoilmasta lämpöenergiaa maalämpöjärjestelmän keruunesteeseen nestelauhdutin ei toimi nimensä mukaisesti lauhduttimena, vaan päinvastoin sitoo nesteeseen lämpöenergiaa. Puhaltimen avulla saadaan tehostettua ulkoilmasta keruunesteeseen tapahtuvaa lämmönsiirtoa. Lämmönvaihtimen avulla saadaan tehokkaasti kompensoitua lämmityskäytössä olevan energiakaivokentän lämpöasetta pienillä puhallin ja pumppauskustannuksilla. [25]

Ilma-neste-lämmönvaihdin voidaan kytkeä usealla tavalla maalämpöjärjestelmän rinnalle. Ilmasta saatavalla lämpöenergialla voidaan esimerkiksi ladata energiakaivoja, nostaa energiakaivoista tulevan keruunesteen lämpötilaa ja esilämmittää käyttövetä. Eri kytkennöillä ja optimaalisilla ohjauksilla ulkolämpötilan, keruunesteen lämpötilan ja lämmitystarpeen mukaan saadaan ilma-neste-lämmönvaihtimesta maksimaalinen hyöty. [25] Tässä työssä tarkastellaan ainoastaan ilmalämmön hyödyntämistä energiakaivojen regeneroimisessa ja keruunesteen lämpötilan nostamisessa. Kuvassa 18 on esitetty periaatekuva ilma-vesi-lämmönvaihtimen kytkemisestä energiakaivojen regeneroimiseen.



Kuva 18 Energiakaivojen regenerointi ulkoilman lämpöenergialla. Muokattu [25].



## 5 Laskentamenetelmä

Aurinko- ja ilmalämpöjärjestelmien vaikutusta maalämpöjärjestelmän energiatehokkuuteen laskettiin MS Exceliin kehitetyllä sovelluksella ja EED -simulointiohjelmalla. Rakennuksen energiantarve, maalämpöpumpun hyötysuhde, aurinko- ja ilmalämpöjärjestelmien tuottama lämpöenergia, apulaitteiden kuluttama sähköenergia sekä elinkaarikustannukset laskettiin Exceliin kehitetyllä sovelluksella. Maalämpöjärjestelmän keruunesteen lämpötilakehitystä mallinnettiin EED:llä. Laskenta suoritettiin kahdelle eri rakennukselle ja kolmelle erikokoiselle ilmajäähdyttimelle, tasokeräin- sekä tyhjiökeräinjärjestelmälle.

### 5.1 Laskentatyökalut

Laskentatyökaluina käytettiin Microsoft Excel taulukkolaskentaohjelmaa ja EED:tä. Rakennuksen tuntikohtaisen energiantarpeen määrittelyssä hyödynnettiin LeaseGreenin Excel-työkalua, joka laskee rakennuksen tuntikohtaisen energiantarpeen, kun siihen syötetään lähtötiedoiksi muun muassa rakennuksen sijainti, rakennuksen kuluttama lämpöenergia ja käytövesi. Kyseistä työkalua muokattiin ottamaan huomioon maalämpöjärjestelmän tuntikohtainen hyötysuhde perustuen keruunesteen paluulämpötilaan. Lisäksi Exceliin tehtiin lisäosa lisäenergiälähteiden tuntikohtaiseen laskentaan.

EED on tietokoneohjelma, jolla voi mallintaa erimuotoisten ja kokoisten energiakaivokenttien keruunesteen lämpötilakehitystä. EED on kehitetty Lundin yliopistossa Ruotsissa. Tarkempaa tietoa EED:stä saa lähteestä [33]. EED:n avulla laskettiin kahden kohteen keruunesteen tuntikohtainen paluulämpötilan kehitys 15 vuoden aikana erilaisilla kaivokentän kuormituksilla.

### 5.2 Laskentaparametrit

Laskennan aika-askeleena käytettiin yhtä tuntia, ja laskenta-ajan pituudeksi valittiin 15 vuotta, jotta energiakaivokenttä ehtii jäähtyä riittävästi, ja lisälämmönlähteestä saatava hyöty suurenee. Auringosta ja ulkoilmasta saatavan lämpöenergian laskenta perustuu TRY2012- testivuoden aineistoihin. Testiaineistosta huomiotiin aurinkolämmön osalta säävyöhyke, ulkoilman lämpötila, ilmansuunta sekä aurinkokeräinten kallistuskulma. Ilmalämmön osalta huomioitiin säävyöhyke, ulkoilman lämpötila ja suhteellinen kosteus.

### 5.3 Laskennan kuvaus

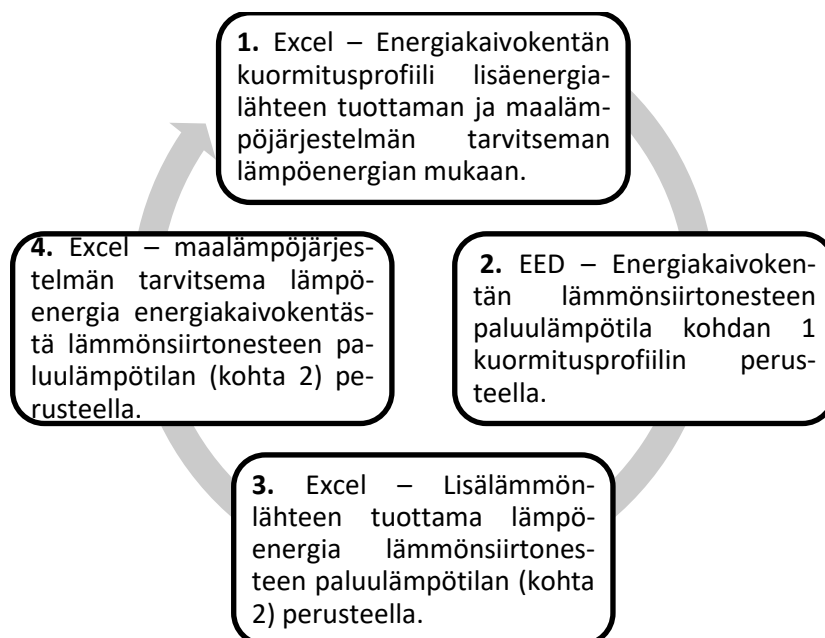
Energiakaivokentän lämmönsiirtonesteen paluulämpötila vaikuttaa maalämpöpumpun hyötysuhteeseen ja näin ollen siihen, kuinka paljon maalämpöpumppu ottaa maankamarasta lämpöenergiaa. Lämmönsiirtonesteen paluulämpötila vaikuttaa myös lisäenergiälähteen tuottamaan lämpöenergiaan. Laskennan tavoitteena oli löytää energiakaivokentän lämmönsiirtonesteen paluulämpötilan kehitykselle tasapainotila 15 vuoden aikana, missä maalämpöpumpun ottama lämpöenergia maankamarasta ja lisäenergiälähteen regeneroima lämpöenergia maankamaraan löytää tasapainotilan.

Laskenta suoritettiin iteroimalla lämmönsiirtonesteen paluulämpötilaa. Ensimmäisellä iteroitukierroksella maalämpöpumpun hyötysuhdetta pidettiin vakiona läpi laskennan, jotta energiakaivokentän lämmönsiirtonesteen paluulämpötilalle saatiin tuntikohtainen alkuarvaus. Vakiohyötysuhteeksi asetettiin 3,2, joka on hyvä maalämpöjärjestelmän vuosihyöty-

suhde. Ensimmäisen kierroksen jälkeen maalämpöpumpun hyötysuhde muuttui tuntikohtaisesti lämmönsiirtonesteen paluulämpötilan mukaan. Ensimmäisen laskentakierroksen jälkeen iterointikierrokset suoritettiin kuvan 19 mukaisesti. Iterointiprosessi suoritettiin vaiheittain seuraavasti:

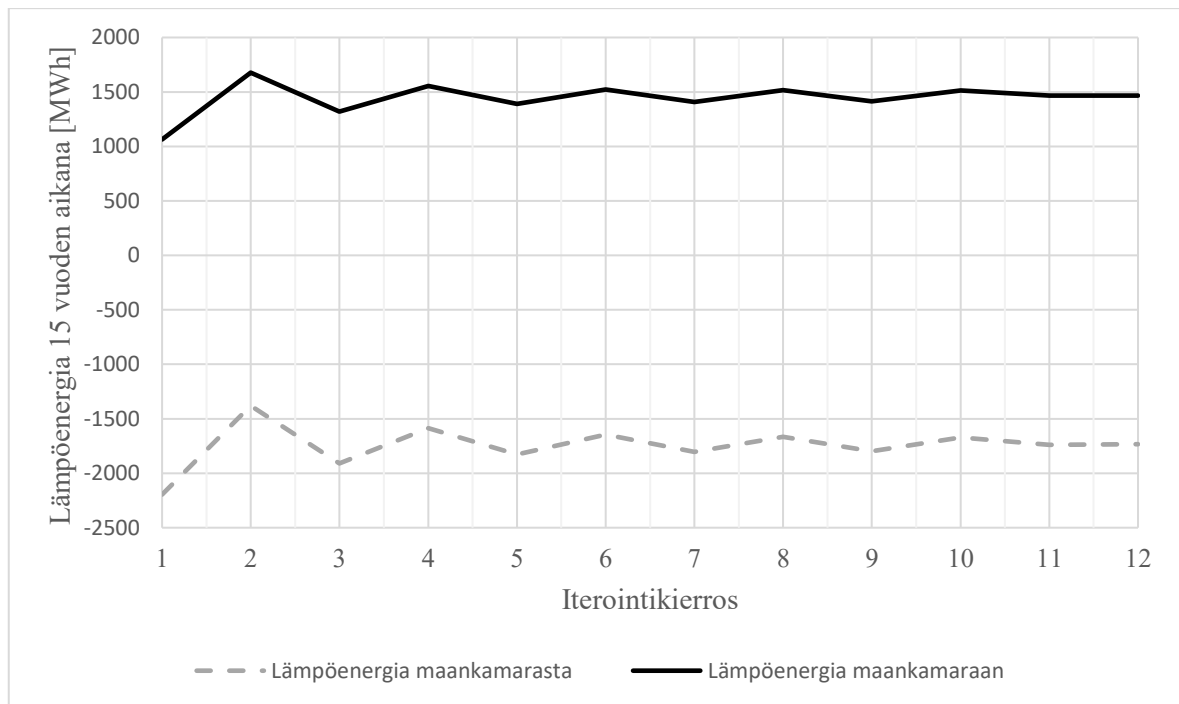
1. Muodostettiin energiakaivokentän kuormitusprofiili maalämpöpumpun tarvitseman ja lisäenergiälähteen tuottaman lämpöenergian mukaan energiakaivokentän lämmönsiirtonesteen paluulämpötilan perusteella.
2. Vaiheen 1 kuormitusprofiili syötettiin EED:hen, joka simuloi uuden lämmönsiirtonesteen paluulämpötilan kehityksen 15 vuoden ajalle.
3. EED:tä saadun lämmönsiirtonesteen paluulämpötilan kehityksen perusteella laskettiin uusi lisäenergiälähteen tuottama tuntikohtainen lämpöenergian määrä.
4. EED:tä saadun lämmönsiirtonesteen paluulämpötilan kehityksen perusteella laskettiin uusi maalämpöpumpun tarvitsema lämpöenergia energiakaivokentästä.

Seuraavan iterointikierroksen vaihe 1 suoritettiin edellisen kierroksen vaiheiden 3 ja 4 tuloksista.



*Kuva 19 Laskennassa toistettujen iterointikierrosten päävaiheet.*

Iterointikierroksia toistettiin siihen asti, kunnes iterointi oli konvergoitunut riittävästi. Riittävänä konvergoitumisena pidettiin sitä, kun maalämpöpumpun ottama lämpöenergia maankamarasta, ja lisäenergiajärjestelmän tuottama lämpöenergia auringosta tai ulkoilmasta 15 vuoden aikana muuttui maksimissaan 5 MWh kahden peräkkäisen iterointikierroksen välillä. Kuvassa 20 on esitetty yhden laskentatapauksen tulosten kehitys iterointikierrosten välillä.



Kuva 20 Maalämpöpumpun ottama lämpöenergia maankamarasta ja lisäenergiälähteen siirtämä lämpöenergia maankamaraan iterointikierrosten välillä.

Maalämpöjärjestelmän energiatehokkuuden parantamista lisälämmönlähteillä tarkasteltiin kahdella erilaisella kytkennällä:

1. Lisälämpöenergian ohjaaminen energiakaivokenttään menevään keruunesteeseen
2. Lisälämpöenergian ohjaaminen energiakaivokentästä palaavaan keruunesteeseen

Kohdan yksi kytkennällä ladataan energiakaivokenttää lämpöä eli regeneroidaan energiakaivokenttää. Kohdan kaksi kytkennällä nostetaan ensisijaisesti maalämpöpumpun höyrystimelle tulevan keruunesteen lämpötilaa, ja näin myös maalämpöpumpun hyötysuhdetta. Kohdan kaksi kytkennän toissijainen vaikutus on energiakaivokentän regeneroiminen, koska maalämpöpumppu hyödyntää vain osan lisälämmönlähteen tuottamasta lämpöenergiasta. Tässä diplomityössä näitä kytkentöjä kutsutaan jatkossa ”Kytkeä 1” (kohta 1) ja ”Kytkeä 2” (kohta 2).

Aluksi etsittiin tasapainotila nykyisten ilman lisälämmönlähdettä toimivien maalämpöjärjestelmien energiakaivokentän lämmönsiirtonesteen paluulämpötilan kehitykselle. Laskenta suoritettiin edellä esitettyjen vaiheiden mukaisesti, mutta vaihe 3 jätettiin pois. Laskenta lopetettiin, kun tulokset olivat konvergoituneet riittävästi. Ilman lisälämmönlähdettä toimivien maalämpöjärjestelmien lämmönsiirtonesteen paluulämpötilan kehitystä tarvittiin myöhemmin arvioitaessa aurinko- ja ilmalämpöjärjestelmien kannattavuutta.

Seuraavaksi laskettiin auringosta ja ulkoilmasta saatavan lämpöenergian määrä sekä niiden vaikutus keruunesteen paluulämpötilaan kytkennällä 1 ja 2 edellä kuvatun iterointiprosessin mukaisesti. Kytkennän 2 kohdalla huomioitiin lisäenergiälähteen tuottaman lämpöenergian vaikutus lämmönsiirtonesteen paluulämpötilaan ja maalämpöpumpun hyötysuhteeseen.

## 6 Tapaustutkimuskohteet

Laskenta suoritettiin kahdelle olemassa olevalle rakennukselle. Toinen rakennus on toimistorakennus ja toinen on asuinkerrostalo. Molempien rakennusten lämmitysjärjestelmänä on maalämpö.

### 6.1 Toimistorakennus

Laskennassa käytetty toimistorakennus sijaitsee Varsinais-Suomen maakunnassa. Kolme kerroksinen toimistorakennus on rakennettu vuonna 1991, ja maalämpöjärjestelmä on asennettu rakennukseen 2010-luvulla. Rakennuksessa on ollut kaukolämpöliittymä maalämpöjärjestelmän rinnalla. Kaukolämpö on toiminut lisäenergian lähteenä, kun maalämpöjärjestelmän lämmitysteho ei ole riittänyt. Kaukolämpö liittymä poistettiin samalla kun rakennukseen tehtiin energiatehokkuustoimenpiteitä sekä lisättiin ilma-vesilämpöpumppuja. Lisäksi maalämpöjärjestelmän lisälämmönlähteeksi lisättiin ilmajäähdytin, jolla kerätään ulkoilman lämpöenergiaa. Taulukossa 2 ja kuvassa 21 on esitetty laskennassa käytetyt lähtötiedot.

Taulukko 2 Toimistorakennuksen laskennan lähtötietoja.

Toimistorakennus lähtötietoja		
Säävyöhyke	I	
Mitoitusulkolämpötila	-26	°C
Lämmitysverkoston lämpötilatasot	70 /40	°C
Normeerattu kokonaislämpöenergia	309	MWh/v
Tilalämmitys	298	MWh/v
Lämmin käyttövesi	11	MWh/v
Maalämpöjärjestelmä		
Lämpöpumppujen lämmitysteho*	134	kW
Lämpöpumppujen tuottama korkein lämpötila	65	°C
Jäähdytysverkoston tuottama energia vuositasolla	5	MWh/v
Energiakaivojen lukumäärä	10	kpl
Kokonaisaktiivimetrit	1950	m
Kallioperän lämmönjohtavuus**	3,3	W/(m·K)
Energiakaivokentän keskilämpötila***	5	°C
Energiakaivon lämpöresistanssi	0,12	(m·K)/W
Lämmönsiirtoneste etanoli 28 p-% 0 °C		

\* (B0W35)

\*\* Kallioperä granodioriitti

\*\*\* Laskenta aloitetaan tammikuun alusta

Lämpökaivo ja lämmönvaihdin

Porausreikä

Tyyppi Normi-U

Ominaisuudet 236 ?  
236 ("10 : 2 x 5, rectangle")

Syvyys 195,00 m

Väli 18,50 m

Halkaisija 114,300 ? mm

Kontak.Lämpövast. putki/kaivoneste 0,0000 (m·K)/W

Täytteen lämmönjohtavuus 0,600 ? W/(m·K)

Tilavuus virtaus Q:  
☐ kaikille lämpökaivoille ☒ per lämpökaivo 0,500 l/s

Sarja kerroin (1 = rinnan) 1  $Q_{bh}=Q=0,5 \text{ l/s}$

U-putki

Ulkohalkaisija 40,000 mm

Seinän paksuus 2,400 ? mm

Lämmönjohtokyky 0,420 W/(m·K)

U-kappaleen putkiväli 65,000 mm

Kuva 21 EED:ssä käytettyjä lähtöarvoja toimistorakennuksen kohdalla.

### 6.1.1 Lämmitysjärjestelmän laskennallinen sähkön kulutus

Tässä työssä maalämpöjärjestelmän sähkön kulutukseen lasketaan maalämpöpumpun kompressorin, energiakaivokentän keruupiirin kiertovesipumpun sekä sähkökattilan kuluttama sähkö. Laskennassa matalin sallittu energiakaivokentän lämmönsiirtonesteen lämpötila oli  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , jonka jälkeen sähkökattila menee päälle ja maalämpöpumppu sammuu. Seuraavassa esitetään apulaitteiden sähkön kulutuksen laskenta sekä järjestelmän sähkön kulutus ja vuosihyötysuhde 15 vuoden ajalta vuositasolla.

Apulaitteiksi luetaan kaivokentän keruupiirin kiertovesipumppu ja sähkökattila. Taulukossa 3 on esitetty laskennassa käytettyjen apulaitteiden sähköteho. Kiertovesipumppujen mitoituksessa on käytetty Grundfos:n mitoitusohjelmaa [34].

Taulukko 3 Toimistorakennuksen maalämpöjärjestelmän apulaitteiden sähkötehot.

Sähkölaitteiden tehotiedot		
Sähkökattila max*	116	kW
Kiertovesipumppu energiakaivokentän keruupiiri**	0,41	kW

\*Sähkökattila säätyy portaattomasti rakennuksen energian tarpeen mukaan

\*\* Arvioitu 100 Pa/m, mitoittavan putkilenkin pituus 470 m ja mitoitusilavuusvirta 5,0 L/s

Taulukossa 4 on esitetty maalämpöjärjestelmän laskennallinen sähkötulutus ilman lisälämmönlähteitä ja vuosihyötysuhde (Seasonal Coefficient of Performance, SCOP) 15 vuoden aikana. Vuosihyötysuhde on määritetty yhtälöllä (19)

$$SCOP = \frac{Q_{\text{lämpö}}}{Q_{\text{sähkö}}} = \frac{Q_{\text{lämpö}}}{Q_{\text{kvp}} + Q_{\text{SK}} + Q_{\text{komp}}}, \quad (19)$$

missä

$Q_{\text{lämpö}}$  on maalämpöpumpun tuottama lämpöenergia vuodessa [MWh/v]

$Q_{\text{sähkö}}$  on maalämpöjärjestelmän kuluttama sähkö vuodessa [MWh/v]

$Q_{\text{kvp}}$  on keruupiirin kiertovesipumpun kuluttama sähkö vuodessa [MWh/v]

$Q_{\text{SK}}$  on sähkökattilan kuluttama sähkö vuodessa [MWh/v]

$Q_{\text{komp}}$  on maalämpöpumpun kompressorin kuluttama sähkö vuodessa [MWh/v]

*Taulukko 4 Toimistorakennuksen maalämpöjärjestelmän sähkön kulutus ja vuosihyötysuhde ilman lisälämmönlähteitä.*

Vuosi	Sähkön kulutus [MWh]	Vuosihyötysuhde [-]
1	90,7	3,4
2	91,9	3,4
3	92,6	3,3
4	93,2	3,3
5	95,4	3,2
6	98,8	3,0
7	105,4	2,7
8	113,6	2,4
9	119,9	2,2
10	126,1	2,0
11	130,2	1,9
12	135,4	1,8
13	139,2	1,7
14	142,7	1,6
15	146,9	1,5
	Yhteensä	Keskiarvo
	1721,8	2,5

Taulukosta 4 nähdään kuinka maalämpöjärjestelmän sähkön kulutus kasvaa ja vuosihyötysuhde heikkenee huomattavasti kuuden toimintavuoden jälkeen. Tämä johtuu siitä, että energiakaivokenttä on alimittainen rakennuksen lämpöenergian tarpeeseen nähden. Kaivokentän lämpötila laskee vuosien mittaan, ja yhä suurempi osa rakennuksen lämpöenergian tarpeesta tuotetaan sähkökattilalla. Tämä laskee huomattavasti järjestelmän hyötysuhdetta.

## 6.2 Asuinkerrostalo

Laskennassa käytetty asuinkerrostalo sijaitsee Kanta-Hämeen maakunnassa. Asuinkerrostalo koostuu kahdesta eri rakennuksesta. Kolme kerroksinen kerrostalo on rakennettu vuonna 1971, ja maalämpöjärjestelmä on asennettu rakennukseen 2010-luvulla. Maalämpöjärjestelmään on kytketty kolme lämmöntalteenottoa (LTO) poistoilmapuhaltimiin. Taulukossa 5 ja kuvassa 22 on esitetty laskennassa käytetyt lähtötiedot.

*Taulukko 5 Asuinkerrostalon laskennan lähtötietoja.*

Asuinkerrostalo lähtötietoja		
Säävyöhyke	II	
Mitoitusulkolämpötila	-29	°C
Lämmitysverkoston lämpötilatasot	70 / 40	°C
Normeerattu kokonaislämpöenergia	502	MWh/v
Tilalämmitys	423	MWh/v
Lämmin käyttövesi	79	MWh/v
Maalämpöjärjestelmä		
Lämpöpumppujen lämmitysteho*	180	kW
Lämpöpumppujen tuottama korkein lämpötila	65	°C
LTO-järjestelmän tuottama energia vuositasolla**	140	MWh/v
Energiakaivojen lukumäärä	9	kpl
Kokonaisaktiivimetrit	2376	m
Kallioperän lämmönjohtavuus***	3,4	W/(m·K)
Energiakaivokentän keskilämpötila****	6	°C
Energiakaivon lämpöresistanssi	0,12	(m·K)/W
Lämmönsiirtoneste etanoli 28 p-% 0 °C		

\* (B0W45)

\*\* Arvio ilmamäärien perusteella. Kuivalle ilmalle

\*\*\* Kallioperä granodioriitti ja gneissigraniitti

\*\*\*\* Laskenta aloitetaan tammikuun alusta

Lämpökaivo ja lämmönvaihdin

Porausreikä

Tyyppi Normi-U

Ominaisuudet 40 ?  
40 ("9 : 4 x 6, L-configuration")

Syvyys 264,00 m

Väli 20,00 m

Halkaisija 114,300 ? mm

Kontak.Lämpövast. putki/kaivoneste 0,0000 (m·K)/W

Täytteen lämmönjohtavuus 0,600 ? W/(m·K)

Tilavuus virtaus Q:  
☐ kaikille lämpökaivoille ☒ per lämpökaivo 0,670 l/s

Sarja kerroin (1 = rinnan) 1  $Q_{bh}=Q=0,67 \text{ l/s}$

U-putki

Ulkohalkaisija 40,000 mm

Seinän paksuus 2,400 ? mm

Lämmönjohtokyky 0,420 W/(m·K)

U-kappaleen putkiväli 68,000 mm

Kuva 22 EED:ssä käytettyjä lähtöarvoja asuinkerrostalon kohdalla.

### 6.2.1 Lämmitysjärjestelmän laskennallinen sähkön kulutus

Apulaitteiksi luetaan kaivokentän keruupiirin kiertovesipumppu ja sähkökattila. Taulukossa 6 on esitetty laskennassa käytettyjen apulaitteiden sähköteho. Kiertovesipumppujen mitoituksessa on käytetty Grundfos:n mitoitusohjelmaa [34].

Taulukko 6 Asuinkerrostalon maalämpöjärjestelmän apulaitteiden sähkötehot.

Sähkölaitteiden tehotiedot		
Sähkökattila max*	180	kW
Kiertovesipumppu energiakaivokentän keruupiiri**	0,75	kW

\*Sähkökattila säätyy portaattomasti rakennuksen energian tarpeen mukaan

\*\* Arvioitu 100 Pa/m, mitoittavan putkilenkin pituus 726 m ja mitoitusvirtausvirta 6,8 L/s

Taulukossa 7 on esitetty maalämpöjärjestelmän laskennallinen sähkökulutus ilman lisälämmönlähteitä ja SCOP 15 vuoden aikana.



*Taulukko 7 Asuinkerrostalon maalämpöjärjestelmän sähkön kulutus ja vuosihyötysuhde ilman lisälämmönlähteitä.*

Vuosi	Sähkön kulutus [MWh]	Vuosihyötysuhde [-]
1	132,8	3,8
2	134,2	3,7
3	134,7	3,7
4	135,1	3,7
5	135,5	3,7
6	135,9	3,7
7	136,2	3,7
8	136,5	3,7
9	136,8	3,7
10	137,5	3,6
11	138,0	3,6
12	138,7	3,6
13	139,0	3,6
14	140,0	3,6
15	141,1	3,5
	Yhteensä	Keskiarvo
	2052,0	3,7

Laskennan tulosten perusteella asuinkerrostalon maalämpöjärjestelmän lämmönlähde eli maankamara ja LTO-järjestelmä on hyvin mitoitettu, eikä järjestelmän hyötysuhteessa tapahdu merkittävää alenemistä 15 vuoden laskenta-ajanjakson aikana. Taulukon 7 tulosten perusteella kohteeseen ei ole tarvetta asentaa lisälämmönlähteitä.

## 7 Aurinkokeräinjärjestelmä maalämpöjärjestelmän lisälämmönlähteenä

Seuraavassa tarkastellaan erikokoisten aurinkolämpöjärjestelmien vaikutusta toimistorakennuksen ja asuinkerrostalon maalämpöjärjestelmien sähkön kulutukseen 15 vuoden tarkastelujaksolla. Ensimmäisenä käsitellään tasokeräimiä lisälämmönlähteenä käyttävän maalämpöjärjestelmän sähkön kulutusta ja seuraavana käsitellään tyhjiökeräimiä lisälämmönlähteenä hyödyntävän maalämpöjärjestelmän sähkön kulutusta.

Auringosta saatavan lämpöenergian laskennassa käytetään lähtötietona TRY2012 testivuoden tuntikohtaista sääaineistoa. Laskennan toisena lähtötietona on maalämpöjärjestelmän keruunesteen tuntikohtainen paluulämpötila energiakaivokentästä. Näiden tietojen, ja valittujen aurinkokeräinten avulla lasketaan auringosta saatava lisälämpöenergia tuntitasolla.

### 7.1 Aurinkokeräinjärjestelmä

Aurinkolämpöjärjestelmän tuotto lasketettiin kohdassa 4.1.3 esitetyllä yhtälöllä (16). Laskentaan valittiin yksi kaupallinen tasokeräin ja yksi kaupallinen tyhjiökeräin. Taulukossa 8 on esitetty näiden keräimien tekniset arvot. Kummastakin valitusta keräintyyppistä tehtiin kolme laskentaa erikokoisilla keräinpinta-aloilla.

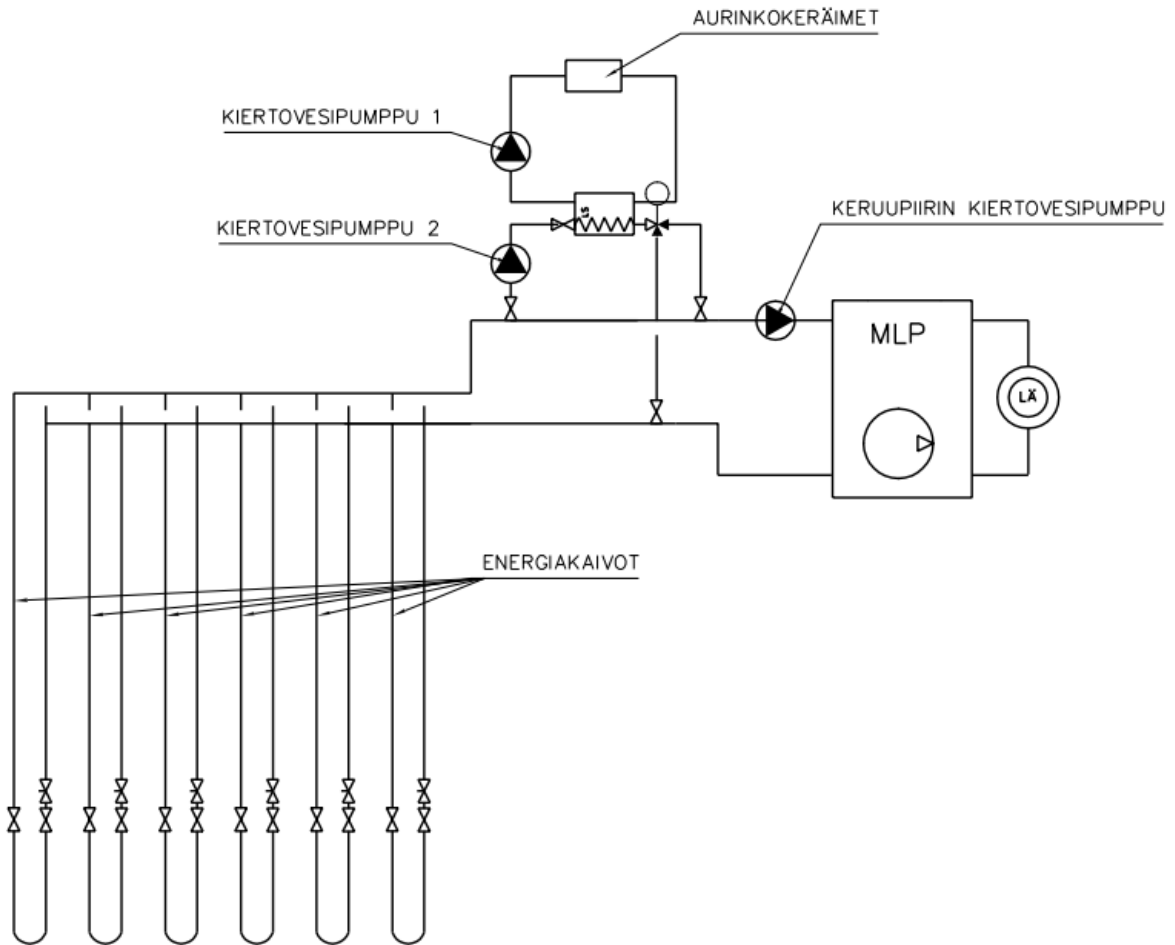
*Taulukko 8 Laskennassa käytettyjen taso- ja tyhjiökeräimen tekniset arvot.*

Tasokeräin		
Lämpöhäviötön hyötysuhde	0,849	(-)
Ensimmäisen kertaluokan lämpöhäviökerroin	3,3778	W/(m <sup>2</sup> ·K)
Toisen kertaluokan lämpöhäviökerroin	0,016	W/(m <sup>2</sup> ·K <sup>2</sup> )
Tasokeräimen kokonaispinta-ala	2,00	m <sup>2</sup>
Tasokeräimen apertuuripinta-ala	1,87	m <sup>2</sup>
Tyhjiökeräin		
Lämpöhäviötön hyötysuhde	0,77	(-)
Ensimmäisen kertaluokan lämpöhäviökerroin	1,5676	W/(m <sup>2</sup> ·K)
Toisen kertaluokan lämpöhäviökerroin	0,005	W/(m <sup>2</sup> ·K <sup>2</sup> )
Tyhjiökeräimen kokonaispinta-ala	1,95	m <sup>2</sup>
Tyhjiökeräimen apertuuripinta-ala	0,93	m <sup>2</sup>

Aurinkokeräinjärjestelmä koostui seuraavista pääkomponenteista:

1. Keräimet
2. Putkisto
3. Lämmönsiirrin
4. Kiertovesipumppu 1
5. Kiertovesipumppu 2

”Kiertovesipumppu 1” kierrättää vesi-glykoliseosta aurinkokeräinjärjestelmässä ja ”kiertovesipumppu 2” kierrättää energiakaivokentän vesi-etanoliseosta aurinkokeräinjärjestelmän lämmönsiirtimen yli. Kuvassa 23 on esitetty kytkentäperiaate. Jatkossa tässä työssä näihin kiertovesipumppuihin viitataan nimellä ”Kiertovesipumppu 1” ja ”Kiertovesipumppu 2.”



Kuva 23 Periaatekuva aurinkokeräinjärjestelmän kytkemisestä maalämpöjärjestelmän lisälämmönlähteeksi.

Aurinkokeräinjärjestelmän lämmönsiirtoaineena käytettiin 30 p-% vesi-glykoliseosta. Taulukossa 9 on esitetty lämmönsiirtoaineen ominaisuudet. Laskentaan asetettiin seuraava reunaehto; ulkoilman lämpötilan on oltava vähintään kolme celsiusastetta korkeampi kuin energiakaivokentästä palaavan keruunesteen lämpötilan, jotta aurinkokeräinjärjestelmä lähtee käyntiin. Aurinkokeräinjärjestelmän keruunesteen oletettiin palautuvan ympäristön lämpötilaan, kun keräinjärjestelmä ei ollut toiminnassa.

Taulukko 9 Aurinkokeräinjärjestelmien lämmönsiirtoaineen fysikaaliset ominaisuudet.

Vesi-glykoliseoksen 30 p-% ominaisuudet		
Ominaislämpökapasiteetti (0 °C)	3,65	kJ/(kg·K)
Tiheys (0 °C)	1040	kg/m <sup>3</sup>

## 7.2 Aurinkokeräinjärjestelmät toimistorakennuksessa

Toimistorakennuksen kattopinta-ala on noin 840 m<sup>2</sup>, ja katto on muodoltaan tasakatto. Tasokeräimien pinta-ala vaihtoehtoisiksi valittiin noin 10 %, 20 % ja 30 % katon kokonaispinta-alasta. Jatkossa eri tasokeräimien pinta-alavaihtoehtoja kutsutaan niitä käsittelevissä luvuissa "Vaihtoehto 1" (10 %), "Vaihtoehto 2" (20 %) ja "Vaihtoehto 3" (30 %). Aurinkokeräimet sijoiteltiin noin 10 keräimen ryhmiksi. Keräinryhmien syvyysuuntainen etäisyys

määräytyi siitä, että 45 ° kulmaan asennettu keräin ei saa varjostaa toista keräintä, kun auringon säteet osuvat aurinkokeräimiin minimissään 35 ° kulmassa katon pintaan nähden.

Tyhjiökeräimien lukumäärä valittiin vastaamaan lähes tasokeräimien apertuuripinta-alaa, jotta tulokset olisivat energiateknisestä näkökulmasta yhtenevät. Tyhjiökeräimien pinta-ala vaihtoehtoja kutsutaan jatkossa niitä käsittelevissä luvuissa ”Vaihtoehto 1”, ”Vaihtoehto 2” ja ”Vaihtoehto 3.” Taulukossa 10 on esitetty toimistorakennuksen laskentaan valittujen aurinkokeräinvaihtoehtojen lukumäärä, kokonaispinta-ala sekä kokonaisapertuuripinta-ala.

*Taulukko 10 Toimistorakennuksen laskennassa käytettyjen aurinkokeräinten lukumäärä, kokonaispinta-ala ja kokonaisapertuuripinta-ala.*

<b>Tasokeräin</b>	<b>Vaihtoehto 1</b>	<b>Vaihtoehto 2</b>	<b>Vaihtoehto 3</b>	
Kokonaismäärä	23	46	69	kpl
Kokonaispinta-ala	84	168	252	m <sup>2</sup>
Kokonaisapertuuripinta-ala	129	86	43	m <sup>2</sup>
<b>Tyhjiökeräin</b>	<b>Vaihtoehto 1</b>	<b>Vaihtoehto 2</b>	<b>Vaihtoehto 3</b>	
Kokonaismäärä	46	92	138	kpl
Kokonaispinta-ala	153	307	460	m <sup>2</sup>
Kokonaisapertuuripinta-ala	129	86	43	m <sup>2</sup>

## 7.2.1 Apulaitteiden sähkön kulutus

Apulaitteiksi luetaan sähkökattila, kaivokentän keruupiirin kiertovesipumppu, kiertovesipumppu 1 ja 2. Taulukossa 11 on esitetty laskennassa käytettyjen apulaitteiden sähköteho. Kiertovesipumppujen mitoituksessa on käytetty Grundfos:n mitoitusohjelmaa [34]. Tarkemmat laskelmat taso- ja tyhjiökeräinjärjestelmien painehäviöistä on esitetty liitteessä 1.

*Taulukko 11 Aurinkokeräinjärjestelmällä varustetun toimistorakennuksen maalämpöjärjestelmän apulaitteiden sähköteho.*

<b>Sähkölaitteiden tehotiedot</b>		
Sähkökattila max*	116	kW
Kiertovesipumppu energiakaivokentän keruupiiri**	0,41	kW
Tasokeräin vaihtoehto 1 - Kiertovesipumppu 1	0,13	kW
Tasokeräin vaihtoehto 1 -Kiertovesipumppu 2***	0,22	kW
Tasokeräin vaihtoehto 2 - Kiertovesipumppu 1	0,17	kW
Tasokeräin vaihtoehto 2 -Kiertovesipumppu 2***	0,22	kW
Tasokeräin vaihtoehto 3 - Kiertovesipumppu 1	0,21	kW
Tasokeräin vaihtoehto 3 -Kiertovesipumppu 2***	2,41	kW
Tyhjiökeräin vaihtoehto 1 - Kiertovesipumppu 1	0,12	kW
Tyhjiökeräin vaihtoehto 1 -Kiertovesipumppu 2***	0,22	kW
Tyhjiökeräin vaihtoehto 2 - Kiertovesipumppu 1	0,16	kW
Tyhjiökeräin vaihtoehto 2 -Kiertovesipumppu 2***	0,22	kW
Tyhjiökeräin vaihtoehto 3 - Kiertovesipumppu 1	0,2	kW
Tyhjiökeräin vaihtoehto 3 -Kiertovesipumppu 2***	0,22	kW

\*Sähkökattila säätyy portaattomasti rakennuksen energian tarpeen mukaan

\*\* Arvioitu 100 Pa/m, mitoittavan putkilenkin pituus 470 m ja mitoitusilavuusvirta 5,0 L/s

\*\*\* Oletettu keruupiirin tilavuusvirran olevan lämmönvaihtimen läpi vakio jokaisessa vaihtoehdossa 3,0 L/s

## 7.2.2 Tasokeräimet maalämpöjärjestelmän lisälämmönlähteenä

Taulukossa 12 on esitetty tasokeräin- ja maalämpöjärjestelmän laskennallinen sähkökulutus ja vuosihyötysuhde 15 vuoden aikana kytkennällä 1. Vuosihyötysuhde on määritetty yhtälöllä (20)

$$SCOP = \frac{Q_{\text{lämpö}}}{Q_{\text{sähkö}}} = \frac{Q_{\text{lämpö}}}{Q_{kvp} + Q_{kvp1} + Q_{kvp2} + Q_{SK} + Q_{komp}}, \quad (20)$$

missä

$Q_{kvp1}$  on kiertovesipumpun 1 kuluttama sähkö vuodessa [MWh/v]

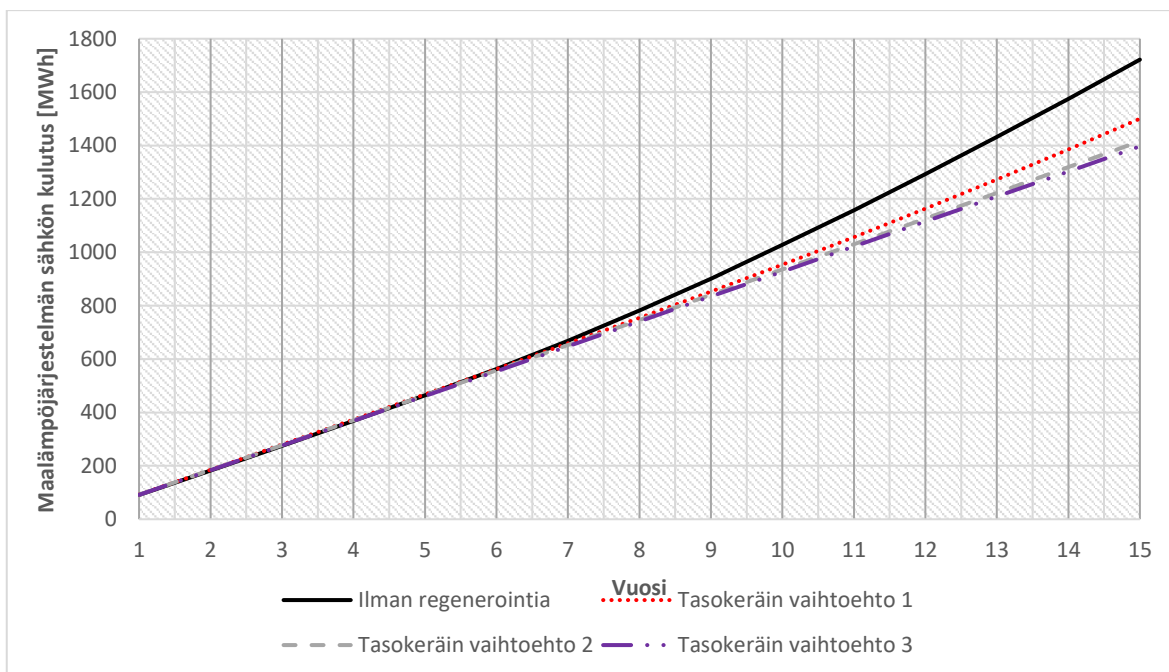
$Q_{kvp2}$  on kiertovesipumpun 2 kuluttama sähkö vuodessa [MWh/v]

*Taulukko 12 Tasokeräin- ja maalämpöjärjestelmän sähkön kulutus ja vuosihyötysuhde 15 vuoden aikana kolmella erikokoisella tasokeräinjärjestelmällä kytkennällä 1.*

	Vaihtoehto 1		Vaihtoehto 2		Vaihtoehto 3	
Vuosi	Sähkön kulutus [MWh]	SCOP [-]	Sähkön kulutus [MWh]	SCOP [-]	Sähkön kulutus [MWh]	SCOP [-]
1	92,1	3,3	91,7	3,4	91,4	3,4
2	93,3	3,3	92,7	3,3	92,1	3,3
3	93,8	3,3	93,1	3,3	92,4	3,3
4	94,2	3,3	93,3	3,3	92,7	3,3
5	94,6	3,3	93,6	3,3	92,8	3,3
6	95,0	3,2	93,8	3,3	93,0	3,3
7	95,3	3,2	94,1	3,3	93,2	3,3
8	96,6	3,2	94,4	3,3	93,3	3,3
9	98,1	3,1	94,6	3,3	93,4	3,3
10	100,6	3,0	94,7	3,3	93,5	3,3
11	103,5	2,9	94,9	3,3	93,6	3,3
12	106,3	2,7	95,4	3,2	93,7	3,3
13	109,4	2,6	96,0	3,2	93,8	3,3
14	112,5	2,5	96,6	3,2	93,9	3,3
15	115,2	2,4	97,4	3,1	94,0	3,3
	Yhteensä	Keskiarvo	Yhteensä	Keskiarvo	Yhteensä	Keskiarvo
	1500,3	3,0	1416,2	3,3	1396,9	3,3

Taulukosta 12 nähdään, että maalämpöjärjestelmän kokonaissähkönkulutus 15 vuoden aikana on sitä pienempi mitä suurempi tasokeräinjärjestelmä on asennettu lisälämmönlähteenä. Toisaalta vaihtoehdon 2 ja 3 sähkön kulutus ei laske niin paljon kuin vaihtoehdon 1 ja 2 välillä. Vaihtoehdon 2 ja 3 vuosihyötysuhteen keskiarvo 15 vuodelle on sama 3,3, ja vaihtoehdon 1 0,3 pienempi. Vaihtoehdon 2 sähkön kulutus on 6 % ja vaihtoehdon 3 7 % pienempi kuin vaihtoehdon 1, kun vaihtoehto 3:n sähkön kulutus on vain 1 % pienempi kuin vaihtoehdon 2.

Kuvassa 24 on kuvattu maalämpöjärjestelmän kumulatiivinen sähkökulutus 15 vuoden aikana ilman regenerointia ja edellä esitetyllä kolmella vaihtoehdolla regeneroituna.



Kuva 24 Toimistorakennuksen maalämpöjärjestelmän sähkön kumulatiivinen kulutus eri tasokeräimen pinta-alavaihtoehtoille 15 vuoden aikana.

Taulukossa 13 on esitetty tasokeräin- ja maalämpöjärjestelmän laskennallinen sähkökulutus ja vuosihyötysuhde 15 vuoden aikana kytkennällä 2.

Taulukko 13 Tasokeräin- ja maalämpöjärjestelmän sähkön kulutus ja vuosihyötysuhde 15 vuoden aikana kolmella erikokoisella tasokeräinjärjestelmällä kytkennällä 2.

Vuosi	Vaihtoehto 1		Vaihtoehto 2		Vaihtoehto 3	
	Sähkön kulutus [MWh]	Vuosihyötysuhde [-]	Sähkön kulutus [MWh]	Vuosihyötysuhde [-]	Sähkön kulutus [MWh]	Vuosihyötysuhde [-]
1	92,0	3,4	91,4	3,4	91,0	3,4
2	93,1	3,3	92,4	3,3	91,7	3,4
3	93,6	3,3	92,8	3,3	92,0	3,4
4	94,0	3,3	93,0	3,3	92,3	3,3
5	94,5	3,3	93,3	3,3	92,4	3,3
6	94,8	3,3	93,6	3,3	92,6	3,3
7	95,2	3,2	93,8	3,3	92,7	3,3
8	96,2	3,2	94,1	3,3	92,9	3,3
9	97,4	3,1	94,3	3,3	93,0	3,3
10	99,2	3,0	94,5	3,3	93,1	3,3
11	101,7	2,9	94,6	3,3	93,2	3,3
12	104,7	2,8	94,7	3,3	93,3	3,3
13	107,3	2,7	94,8	3,3	93,4	3,3
14	110,2	2,6	94,8	3,3	93,5	3,3
15	112,9	2,5	94,8	3,3	93,6	3,3
	Yhteensä	Keskiarvo	Yhteensä	Keskiarvo	Yhteensä	Keskiarvo
	1486,9	3,1	1406,9	3,3	1390,8	3,3

Kuten taulukosta 13 nähdään, kytkentä 2 kuluttaa hieman vähemmän sähköä kuin kytkentä 1 jokaisen vaihtoehdon kohdalla. Vaihtoehdon 1 kytkentä 2 kuluttaa noin 0,9 %, vaihtoehdon 2 kytkentä 2 noin 0,7 % ja vaihtoehdon 3 kytkentä 2 noin 0,4 % vähemmän sähköä kuin samaiset vaihtoehdot kytkennällä 1. Vaihtoehdon 1 SCOP arvo on kytkennällä 2 3,1 ja vaihtoehdoilla 2 ja 3 SCOP pysyivät samana.

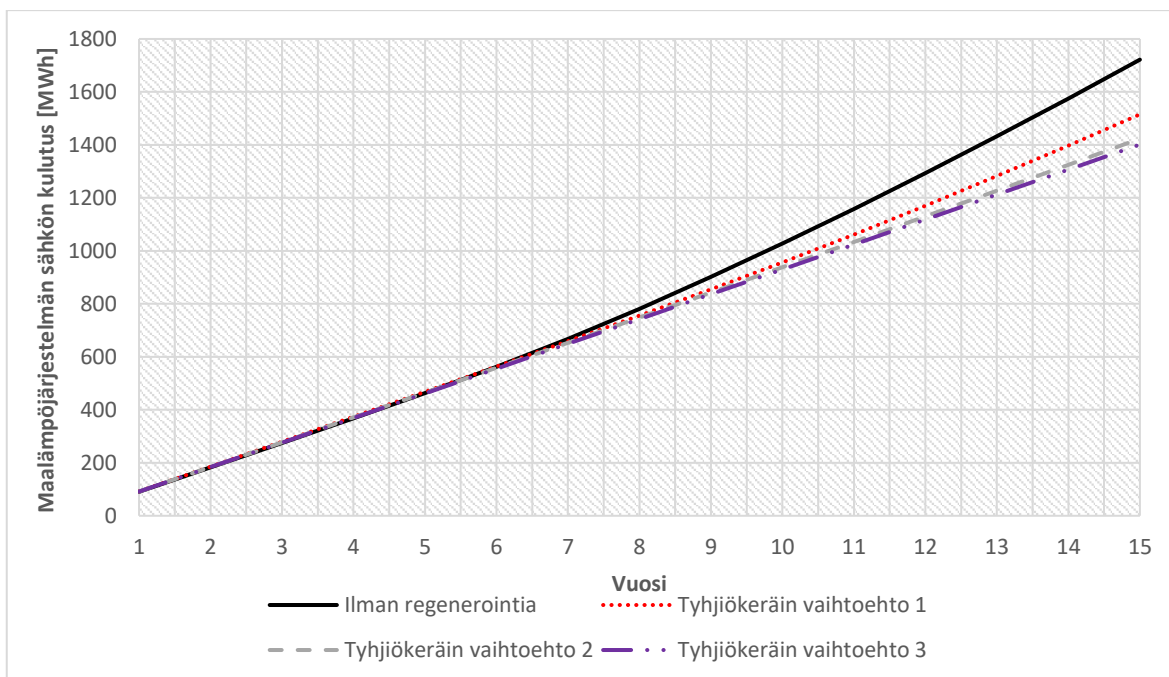
### 7.2.3 Tyhjiökeräimet maalämpöjärjestelmän lisälämmönlähteenä

Taulukossa 14 on esitetty tyhjiökeräin- ja maalämpöjärjestelmän laskennallinen sähkökulutus ja vuosihyötysuhde 15 vuoden aikana kytkennällä 1.

*Taulukko 14 Tyhjiökeräin- ja maalämpöjärjestelmän sähkön kulutus ja vuosihyötysuhde 15 vuoden aikana kolmella erikokoisella tyhjiökeräinjärjestelmällä kytkennällä 1.*

	Vaihtoehto 1		Vaihtoehto 2		Vaihtoehto 3	
Vuosi	Sähkön kulutus [MWh]	SCOP [-]	Sähkön kulutus [MWh]	SCOP [-]	Sähkön kulutus [MWh]	SCOP [-]
1	92,1	3,3	91,8	3,4	91,4	3,4
2	93,3	3,3	92,8	3,3	92,3	3,3
3	93,8	3,3	93,2	3,3	92,6	3,3
4	94,2	3,3	93,5	3,3	92,9	3,3
5	94,7	3,3	93,8	3,3	93,1	3,3
6	95,1	3,2	94,1	3,3	93,2	3,3
7	95,7	3,2	94,4	3,3	93,4	3,3
8	97,1	3,1	94,6	3,3	93,6	3,3
9	98,8	3,1	94,9	3,3	93,7	3,3
10	101,9	2,9	95,1	3,2	93,9	3,3
11	105,2	2,8	95,7	3,2	94,0	3,3
12	108,5	2,6	96,2	3,2	94,1	3,3
13	111,7	2,5	96,8	3,2	94,3	3,3
14	114,9	2,4	97,8	3,1	94,4	3,3
15	118,1	2,3	99,4	3,0	94,6	3,3
	Yhteensä	Keskiarvo	Yhteensä	Keskiarvo	Yhteensä	Keskiarvo
	1515,2	3,0	1423,9	3,2	1401,4	3,3

Toimistorakennuksen maalämpöjärjestelmän sähkön kulutuksessa ei ole juurikaan eroa, onko maalämpöjärjestelmän lisälämmönlähteeksi kytketty taso- vai tyhjiökeräin. Tyhjiökeräinjärjestelmällä varustetun sähkön kulutus on vain hieman suurempi kuin tasokeräinjärjestelmällä varustetun maalämpöjärjestelmän, alle yhden prosentin jokaisessa vaihtoehdossa. Kuvassa 25 on esitetty maalämpöjärjestelmän kumulatiivinen sähkön kulutus 15 vuoden aikana ilman regenerointia sekä tyhjiökeräinjärjestelmällä varustetulle maalämpöjärjestelmille.



Kuva 25 Toimistorakennuksen maalämpöjärjestelmän sähkön kumulatiivinen kulutus tyhjiökerääjän eri apertuuripinta-alavaihtoehtoille 15 vuoden aikana.

Tyhjiökeräimen osalta ei tehty laskentoja kytkentätavalla 2, koska kuten tasokeräimen tapauksessa huomattiin, kytkennällä 2 saavutetut säästöt olivat melko pieniä vaihtoehdosta riippumatta.

### 7.3 Aurinkokeräinjärjestelmät asuinkerrostalossa

Asuinkerrostalon kokonaiskattopinta-ala on noin 930 m<sup>2</sup>, ja katto on muodoltaan tasakatto. Tasokeräimien pinta-alavaihtoehtoiksi valittiin toimistorakennuksen tavoin noin 10 %, 20 % ja 30 % katon kokonaispinta-alasta. Asuinrakennuksen kohdalla käytetään yhteneviä kohdassa 7.2 käytettyjä määritelmiä ja nimeämissä kuin toimistorakennuksen kohdalla. Taulukossa 15 on esitetty asuinkerrostalon aurinkokeräin pinta-alat ja keräimien lukumäärät.

Taulukko 15 Asuinkerrostalon laskennassa käytettyjen aurinkokeräinten lukumäärä, kokonaispinta-ala ja kokonaisapertuuripinta-ala.

Tasokeräin	Vaihtoehto 1	Vaihtoehto 2	Vaihtoehto 3	
Kokonaismäärä	25	51	76	kpl
Kokonaispinta-ala	280	187	93	m <sup>2</sup>
Kokonaisapertuuripinta-ala	142	95	47	m <sup>2</sup>
Tyhjiökeräin	Vaihtoehto 1	Vaihtoehto 2	Vaihtoehto 3	
Kokonaismäärä	50	102	152	kpl
Kokonaispinta-ala	507	340	167	m <sup>2</sup>
Kokonaisapertuuripinta-ala	142	95	47	m <sup>2</sup>



### 7.3.1 Apulaitteiden sähkön kulutus

Apulaitteiden sähkön kulutus on määritelty vastaavasti kuin toimistorakennuksen kohdalla kohdassa 7.2.1. Asuinkerrostalon laskennassa käytettiin apulaitteiden sähkötehoina taulukon 16 arvoja. Tyhjiökeräin vaihtoehtojen 2 ja 3 kohdalla tyhjiökeräimet eivät mahtuneet yhdelle katolle (liite 1, kuva 2). Tästä johtuen näihin vaihtoehtoihin lisättiin yhden kiertovesipumput. Taulukossa 16 olevat arvot ovat näiden kahden kiertovesipumpun yhteisteho. Tarkemmat laskelmat taso- ja tyhjiökeräinjärjestelmien painehäviöistä on esitetty liitteessä 1.

*Taulukko 16 Aurinkokeräinjärjestelmällä varustetun asuinkerrostalon maalämpöjärjestelmän apulaitteiden sähköteho.*

Sähkölaitteiden tehotiedot		
Sähkökattila max*	180	kW
Kiertovesipumppu energiakaivokentän keruupiiri**	0,75	kW
Tasokeräin vaihtoehto 1 - Kiertovesipumppu 1	0,14	kW
Tasokeräin vaihtoehto 1 - Kiertovesipumppu 2***	0,22	kW
Tasokeräin vaihtoehto 2 - Kiertovesipumppu 1	0,18	kW
Tasokeräin vaihtoehto 2 - Kiertovesipumppu 2***	0,22	kW
Tasokeräin vaihtoehto 3 - Kiertovesipumppu 1	0,23	kW
Tasokeräin vaihtoehto 3 - Kiertovesipumppu 2***	2,41	kW
Tyhjiökeräin vaihtoehto 1 - Kiertovesipumppu 1	0,13	kW
Tyhjiökeräin vaihtoehto 1 - Kiertovesipumppu 2***	0,22	kW
Tyhjiökeräin vaihtoehto 2 - Kiertovesipumppu 1	0,26	kW
Tyhjiökeräin vaihtoehto 2 - Kiertovesipumppu 2***	0,22	kW
Tyhjiökeräin vaihtoehto 3 - Kiertovesipumppu 1	0,3	kW
Tyhjiökeräin vaihtoehto 3 - Kiertovesipumppu 2***	0,22	kW

\*Sähkökattila säätyy portaattomasti rakennuksen energian tarpeen mukaan

\*\* Arvioitu 100 Pa/m, mitoittavan putkilenkin pituus 726 m ja mitoitusilavuusvirta 6,8 L/s

\*\*\* Oletettu keruupiirin tilavuusvirran olevan lämmönvaihtimen läpi vakio jokaisessa vaihtoehtossa 3,0 L/s

### 7.3.2 Tasokeräimet maalämpöjärjestelmän lisälämmönlähteenä

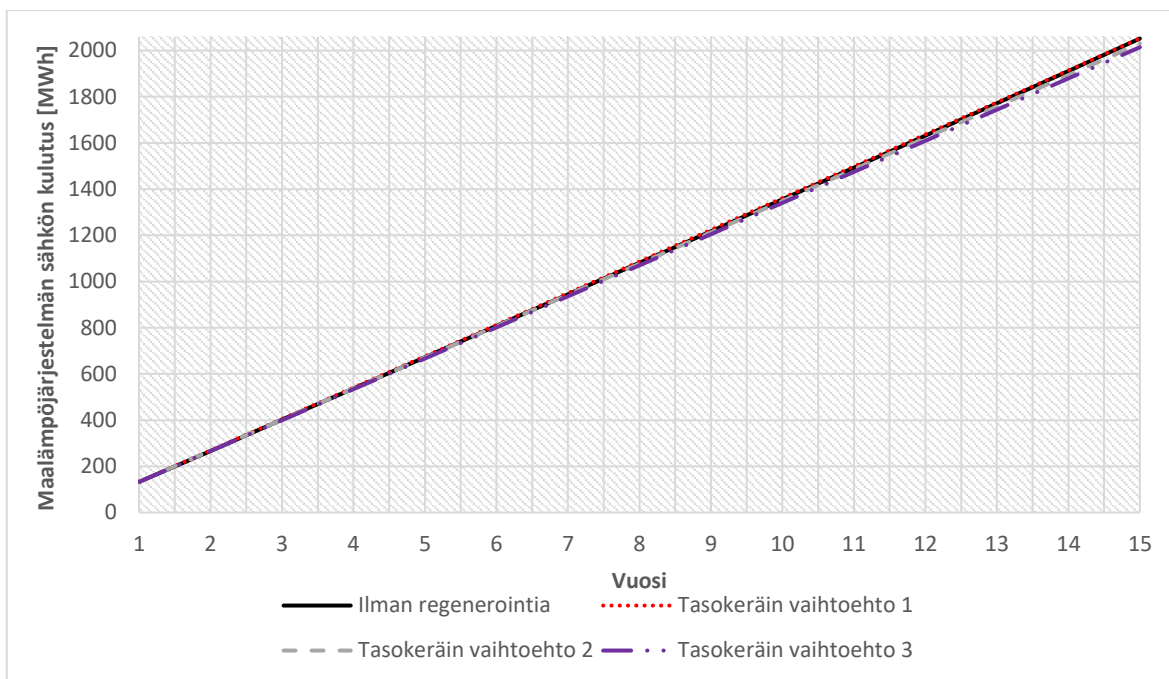
Taulukossa 17 on esitetty tasokeräin- ja maalämpöjärjestelmän laskennallinen sähkökulutus ja vuosihyötysuhde 15 vuoden aikana kytkennällä 1.

*Taulukko 17 Tasokeräin- ja maalämpöjärjestelmän sähkön kulutus ja vuosihyötysuhde 15 vuoden aikana kolmella erikokoisella tasokeräinjärjestelmällä kytkennällä 1.*

	Vaihtoehto 1		Vaihtoehto 2		Vaihtoehto 3	
Vuosi	Sähkön kulutus [MWh]	SCOP [-]	Sähkön kulutus [MWh]	SCOP [-]	Sähkön kulutus [MWh]	SCOP [-]
1	133,8	3,8	133,2	3,8	132,7	3,8
2	135,1	3,7	134,2	3,7	133,4	3,8
3	135,5	3,7	134,5	3,7	133,7	3,8
4	135,9	3,7	134,8	3,7	133,9	3,8
5	136,2	3,7	135,0	3,7	134,1	3,7
6	136,5	3,7	135,2	3,7	134,2	3,7
7	136,7	3,7	135,4	3,7	134,4	3,7
8	136,9	3,7	135,6	3,7	134,5	3,7
9	137,1	3,7	135,7	3,7	134,5	3,7
10	137,3	3,7	135,8	3,7	134,6	3,7
11	137,5	3,7	136,0	3,7	134,7	3,7
12	138,1	3,6	136,1	3,7	134,8	3,7
13	138,4	3,6	136,2	3,7	134,9	3,7
14	138,8	3,6	136,3	3,7	135,0	3,7
15	139,1	3,6	136,4	3,7	135,0	3,7
	Yhteensä	Keskiarvo	Yhteensä	Keskiarvo	Yhteensä	Keskiarvo
	2053,0	3,7	2030,3	3,7	2014,4	3,7

Asuinkerrostalon kohdalla käyttämällä tasokeräinjärjestelmää maalämpöjärjestelmän lisälämmönlähteenä ei saavuteta juurikaan säästöjä sähkön kulutuksessa 15 vuoden aikana. Vaihtoehdossa 1 sähkön kulutus jopa lisääntyi hieman. Suuremmilla tasokeräinjärjestelmillä sähkön kulutusta saatiin vähennettyä vain 1 % (vaihtoehto 2) ja 2 % (vaihtoehto 3).

Kuvassa 26 on kuvattu asuinkerrostalon maalämpöjärjestelmän kumulatiivinen sähkönkulutus 15 vuoden aikana ilman regenerointia ja edellä esitetyllä kolmella tasokeräin vaihtoehdolla regeneroituna.



Kuva 26 Asuinkerrostalon maalämpöjärjestelmän sähkön kumulatiivinen kulutus eri tasokeräimen pinta-alavaihtoehdoille 15 vuoden aikana.

Taulukossa 18 on esitetty tasokeräin- ja maalämpöjärjestelmän laskennallinen sähkökulutus ja vuosihyötysuhde 15 vuoden aikana kytkennällä 2.

Taulukko 18 Tasokeräin- ja maalämpöjärjestelmän sähkön kulutus ja vuosihyötysuhde 15 vuoden aikana kolmella erikokoisella tasokeräinjärjestelmällä kytkennällä 2.

	Vaihtoehto 1		Vaihtoehto 2		Vaihtoehto 3	
Vuosi	Sähkön kulutus [MWh]	SCOP [-]	Sähkön kulutus [MWh]	SCOP [-]	Sähkön kulutus [MWh]	SCOP [-]
1	135,6	3,7	134,8	3,7	134,1	3,7
2	134,9	3,7	133,7	3,8	132,8	3,8
3	135,3	3,7	134,1	3,7	133,1	3,8
4	135,7	3,7	134,4	3,7	133,3	3,8
5	136,0	3,7	134,6	3,7	133,5	3,8
6	136,2	3,7	134,8	3,7	133,6	3,8
7	136,4	3,7	135,0	3,7	133,8	3,8
8	136,7	3,7	135,1	3,7	133,9	3,8
9	136,9	3,7	135,3	3,7	134,0	3,7
10	137,1	3,7	135,4	3,7	134,1	3,7
11	137,2	3,7	135,5	3,7	134,1	3,7
12	137,4	3,7	135,6	3,7	134,2	3,7
13	137,6	3,6	135,7	3,7	134,3	3,7
14	137,7	3,6	135,9	3,7	134,4	3,7
15	138,1	3,6	135,9	3,7	134,4	3,7
	Yhteensä	Keskiarvo	Yhteensä	Keskiarvo	Yhteensä	Keskiarvo
	2048,7	3,7	2025,8	3,7	2007,5	3,8

Kytettäessä tasokeräinjärjestelmä nostamaan ensisijaisesti keruupiirin lämmönsiirtonesteen lämpötilaa ennen höyrystintä, saadaan järjestelmän kokonaissähkön kulutusta hieman tiputettua verrattuna kytkentä 1:een. Säästöt ovat kuitenkin alle yhden prosentin jokaisen vaihtoehdon kohdalla. Vaihtoehdon 3 tapauksessa 15 vuoden keskiarvoinen SCOP on 0,1 parempi kuin ilman lisälämmönlähdettä olevan maalämpöjärjestelmän.

### 7.3.3 Tyhjiökeräimet maalämpöjärjestelmän lisälämmönlähteenä

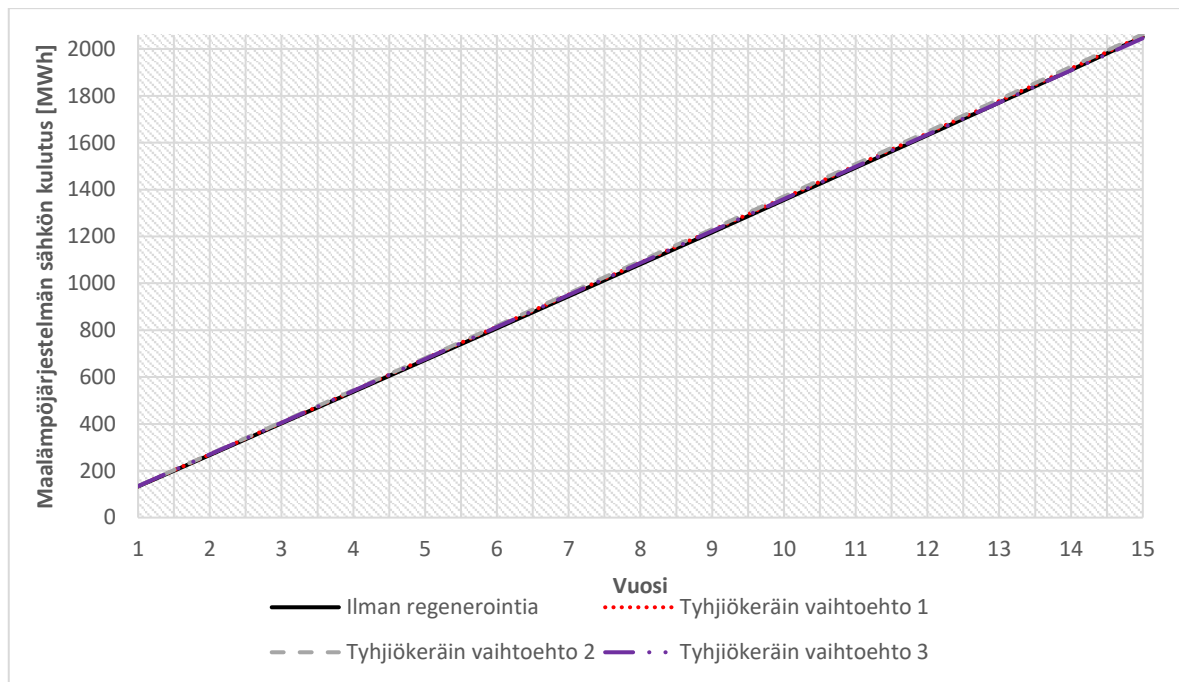
Taulukossa 19 on esitetty asuinkerrostalon tyhjiökeräin- ja maalämpöjärjestelmän laskennallinen sähkökulutus ja vuosihyötysuhde 15 vuoden aikana kytkennällä 1.

*Taulukko 19 Tyhjiökeräin- ja maalämpöjärjestelmän sähkön kulutus ja vuosihyötysuhde 15 vuoden aikana kolmella erikokoisella tyhjiökeräinjärjestelmällä kytkennällä 1.*

	Vaihtoehto 1		Vaihtoehto 2		Vaihtoehto 3	
Vuosi	Sähkön kulutus [MWh]	SCOP [-]	Sähkön kulutus [MWh]	SCOP [-]	Sähkön kulutus [MWh]	SCOP [-]
1	133,9	3,7	134,9	3,7	134,3	3,7
2	135,2	3,7	136,1	3,7	135,3	3,7
3	135,7	3,7	136,5	3,7	135,6	3,7
4	136,1	3,7	136,8	3,7	135,9	3,7
5	136,5	3,7	137,1	3,7	136,1	3,7
6	136,8	3,7	137,3	3,7	136,3	3,7
7	137,0	3,7	137,6	2,2	136,4	3,7
8	137,3	3,7	137,8	3,6	136,6	3,7
9	137,5	3,7	137,9	3,6	136,7	3,7
10	137,8	3,6	138,1	3,6	136,8	3,7
11	138,0	3,6	138,3	3,6	137,0	3,7
12	138,2	3,6	138,4	3,6	137,1	3,7
13	138,3	3,6	138,6	3,6	137,2	3,7
14	138,9	3,6	138,7	3,6	137,3	3,7
15	139,1	3,6	138,9	3,6	137,3	3,7
	Yhteensä	Keskiarvo	Yhteensä	Keskiarvo	Yhteensä	Keskiarvo
	2056,3	3,7	2063,0	3,6	2046,0	3,7

Laskennan tulokseksi saatiin, että vain vaihtoehto kolmella varustettu maalämpöjärjestelmä vähentäisi sähkön kulutusta 15 vuoden tarkasteluajanjakson aikana. Tällöinkin saavutettu säästö on mitätön, vain 6 MWh (0,3 %) vähemmän mitä ilman lisälämmönlähdettä toimiva maalämpöjärjestelmä. Vaihtoehto 1 ja 2 ja kuluttavat hieman enemmän sähköä kuin alkuperäinen järjestelmä.

Kuvassa 27 on esitetty tyhjiökeräinjärjestelmällä varustettujen ja alkuperäisen maalämpöjärjestelmän sähkön kumulatiivinen kertyminen 15 vuoden aikana.



Kuva 27 Asuinkerrostalon maalämpöjärjestelmän sähkön kumulatiivinen kulutus eri tyhjiökeräimen apertuuripinta-alavaihtoehtoille 15 vuoden aikana.

## 8 Ilmalämpöjärjestelmä maalämpöjärjestelmän lisälämmönlähteenä

Seuraavassa käsitellään erikokoisten ilmalämpöjärjestelmien vaikutusta toimistorakennuksen ja asuinkerrostalon maalämpöjärjestelmien sähkön kulutukseen 15 vuoden tarkastelujaksolla

Ulkoilmasta saatavan lämpöenergian laskennassa käytetään lähtötietona TRY2012 testivuoden tuntikohtaista sääaineistoa. Laskennan toisena lähtötietona on maalämpöjärjestelmän keruunesteen tuntikohtainen paluulämpötila energiakaivokentästä. Näiden tietojen, ja valittujen ilmajäähdyttimien avulla lasketaan ulkoilmasta saatava lisälämpöenergia tuntitasolla.

### 8.1 Ilmalämpöjärjestelmät

Ilmalämpöjärjestelmän tuottama lämpöenergian laskennassa hyödynnettiin erään ilmajäähdyttimiä valmistavan yrityksen mitoitusohjelmaa. Laskentaan valittiin kolme erikokoista ilmajäähdytintä. Erikoisia ilmajäähdyttimiä kutsutaan jatkossa niitä käsittelevissä luvuissa ”Vaihtoehto 1”, ”Vaihtoehto 2” ja ”Vaihtoehto 3” tarkasteltaessa ilmalämpöjärjestelmää maalämpöjärjestelmän lisälämmönlähteenä. Taulukossa 20 on esitetty näiden ilmajäähdyttimien tekniset arvot.

*Taulukko 20 Laskennassa käytettyjen ilmajäähdytinvaihtoehtojen lämpötehot.*

Ilmajäähdyttimien tekniset tiedot		
Lämpöteho - vaihtoehto 1*	30,4	kW
Lämpöteho - vaihtoehto 2**	32,7	kW
Lämpöteho - vaihtoehto 3***	44,5	kW

\* Ilma +15 °C, RH 50 %. Keruuneste 0 °C, tilavuusvirta 2,0 L/s

\*\* Ilma +15 °C, RH 50 %. Keruuneste 0 °C, tilavuusvirta 4,0 L/s

\*\*\* Ilma +15 °C, RH 50 %. Keruuneste 0 °C, tilavuusvirta 6,0 L/s

Ilmalämpöjärjestelmä koostui seuraavista pääkomponenteista:

1. Ilmajäähdytin
2. Putkisto
3. Kiertovesipumppu 1

Mitoitusohjelman avulla määritettiin ilmajäähdyttimien lämpöteho eri toimipisteissä taulukossa 20 esitetyille kolmelle vaihtoehdolle. Toimipisteiden määrittelyssä ilman ja energiakaivonkentan keruunesteen lämpötila huomioitiin yhden celsiusasteen tarkkuudella. Ilman suhteellinen kosteus huomioitiin 10 % tarkkuudella siten, että TRY2012 tuntikohtaisen aineiston antama suhteellinen kosteus pyöristettiin lähimpään valittuun suhteellisen kosteuden arvoon.

### 8.2 Ilmalämpöjärjestelmät toimistorakennuksessa

Seuraavissa alaluvuissa käsitellään edellisessä alaluvussa esitettyjen ilmajäähdyttimien käyttämistä toimistorakennuksen maalämpöjärjestelmän lisälämmönlähteenä.

## 8.2.1 Apulaitteiden sähkön kulutus

Apulaitteiksi luetaan sähkökattila, kaivokentän keruupiirin kiertovesipumppu, kiertovesipumppu 1 ja ilmajäädyttimien puhaltimet. Taulukossa 21 on esitetty laskennassa käytettyjen apulaitteiden sähköteho. Kiertovesipumppujen mitoituksessa on käytetty Grundfos:n mitoitusohjelmaa [34]. Tarkemmat laskelmat ilmalämpöjärjestelmän painehäviöistä on esitetty liitteessä 2.

*Taulukko 21 Ilmalämpöjärjestelmällä varustetun maalämpöjärjestelmän apulaitteiden sähköteho.*

Sähkölaitteiden tehotiedot		
Sähkökattila max*	116	kW
Kiertovesipumppu energiakaivokentän keruupiiri**	0,41	kW
Ilmajäädytin vaihtoehto 1 - Kiertovesipumppu 1	0,08	kW
Ilmajäädytin vaihtoehto 2 - Kiertovesipumppu 1	0,21	kW
Ilmajäädytin vaihtoehto 3 - Kiertovesipumppu 1	0,34	kW
Puhaltimien kokonaissähköteho - vaihtoehto 1	0,68	kW
Puhaltimien kokonaissähköteho - vaihtoehto 2	0,3	kW
Puhaltimien kokonaissähköteho - vaihtoehto 3	0,4	kW

\*Sähkökattila säätyy portaattomasti rakennuksen energian tarpeen mukaan

\*\* Arvioitu 100 Pa/m, mitoittavan putkilenkin pituus 470 m ja mitoitusilavuusvirta 5,0 L/s

## 8.2.2 Ilmajäädyttimet maalämpöjärjestelmän lisälämmönlähteenä

Taulukossa 22 on esitetty ilma- ja maalämpöjärjestelmän laskennallinen sähkökulutus ja vuosihyötysuhde 15 vuoden aikana kytkennällä 1. Vuosihyötysuhde on määritetty yhtälöllä (21)

$$SCOP = \frac{Q_{\text{lämpö}}}{Q_{\text{sähkö}}} = \frac{Q_{\text{lämpö}}}{Q_{kvp} + Q_{kvp1} + Q_{kvp2} + Q_p + Q_{SK} + Q_{komp}}, \quad (21)$$

missä

$Q_p$  on ilmajäädyttimen puhaltimien kuluttama sähkö vuodessa [MWh/v]

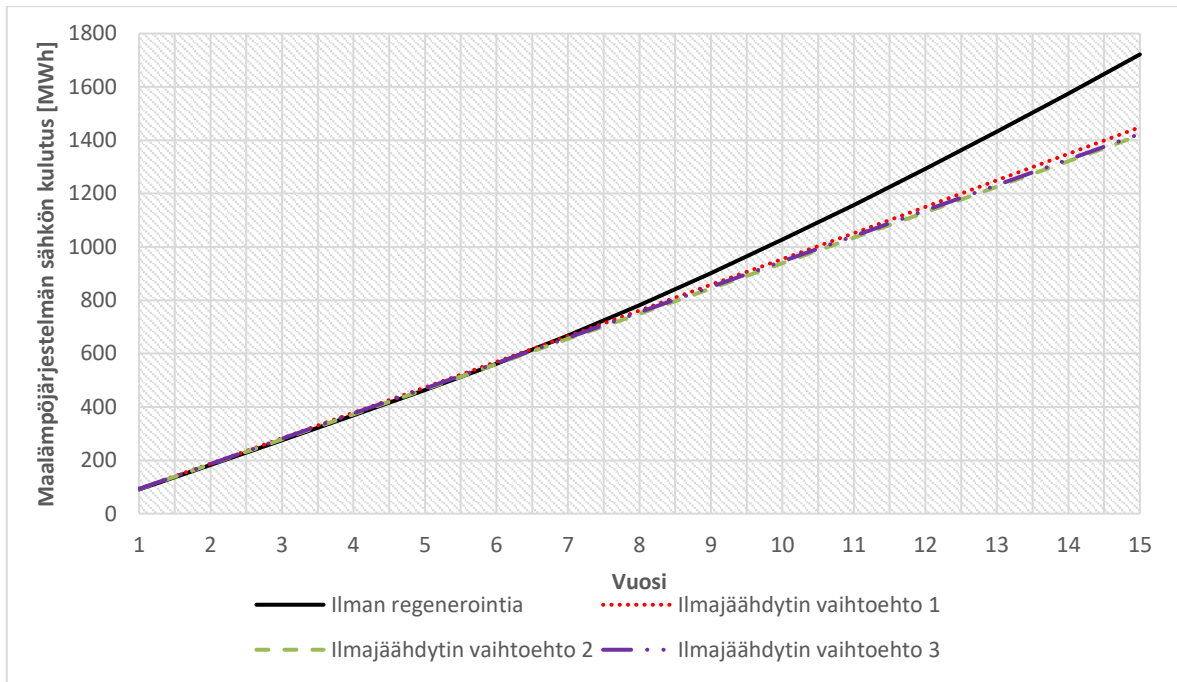
*Taulukko 22 Ilma- ja maalämpöjärjestelmän sähkön kulutus ja vuosihyötysuhde 15 vuoden aikana kolmella erikokoisella ilmajäähdyttimellä kytkennällä 1.*

Vuosi	Vaihtoehto 1		Vaihtoehto 2		Vaihtoehto 3	
	Sähkön kulutus [MWh]	SCOP [-]	Sähkön kulutus [MWh]	SCOP [-]	Sähkön kulutus [MWh]	SCOP [-]
1	93,4	3,3	92,2	3,3	92,9	3,3
2	94,5	3,3	93,1	3,3	93,8	3,3
3	94,9	3,3	93,5	3,3	94,2	3,3
4	95,2	3,2	93,8	3,3	94,4	3,3
5	95,5	3,2	94,0	3,3	94,6	3,3
6	95,7	3,2	94,2	3,3	94,8	3,3
7	96,0	3,2	94,4	3,3	95,0	3,2
8	96,2	3,2	94,6	3,3	95,1	3,2
9	96,4	3,2	94,7	3,3	95,3	3,2
10	96,8	3,2	94,9	3,3	95,4	3,2
11	97,4	3,2	95,0	3,2	95,5	3,2
12	98,2	3,1	95,3	3,2	95,6	3,2
13	99,0	3,1	95,9	3,2	95,7	3,2
14	99,7	3,0	96,4	3,2	95,7	3,2
15	100,0	3,0	96,9	3,2	95,8	3,2
	Yhteensä	Keskiarvo	Yhteensä	Keskiarvo	Yhteensä	Keskiarvo
	1449,1	3,2	1418,9	3,3	1423,7	3,3

Taso- ja tyhjiökeräinjärjestelmistä poiketen ilmalämpöä lisälämmönlähteenä hyödyntävän maalämpöjärjestelmän sähkön kulutus ei vähene jokaisen teholtaan suuremman vaihtoehdon kohdalla tarkasteltavan toimistorakennuksen tapauksessa. Kuten taulukosta 22 nähdään, vaihtoehto 2 kuluttaa vähiten sähköä 15 vuoden tarkastelujakson aikana. Vaihtoehto 3 kuluttaa vain hieman enemmän sähköä (0,3 %) ja vaihtoehto 1 noin 2 % prosenttia enemmän kuin vaihtoehto 2.

Kuvassa 28 on esitetty toimistorakennuksen maalämpöjärjestelmän kumulatiivinen sähkön kulutus 15 vuoden aikana, kun energiakaivokenttää regeneroidaan kolmella erikokoisella ilmajäähdyttimellä sekä ilman regenerointia.





Kuva 28 Toimistorakennuksen maalämpöjärjestelmän sähkön kumulatiivinen kulutus erikoisilla ilmajäähdytimillä regeneroituna sekä ilman regenerointia 15 vuoden aikana.

Kuvasta 28 nähdään hyvin, että valittujen ilmajäähdytimien koko ei aiheuta juurikaan vaihtelua maalämpöjärjestelmän sähköenergian kulutukseen 15 vuoden aikana. Verrattuna maalämpöjärjestelmään ilman regenerointia sähkön kulutus vähenee 15 vuoden aikana keskimäärin 17 % (noin 290 MWh).

Taulukossa 23 on esitetty ilma- ja maalämpöjärjestelmän laskennallinen sähkökulutus ja vuosihyötysuhde 15 vuoden aikana kytkennällä 2.

*Taulukko 23 Ilma- ja maalämpöjärjestelmän sähkön kulutus ja vuosihyötysuhde 15 vuoden aikana kolmella erikokoisella ilmajäähdyttimellä kytkennällä 2.*

	Vaihtoehto 1		Vaihtoehto 2		Vaihtoehto 3	
Vuosi	Sähkön kulutus [MWh]	Vuosihyötysuhde [-]	Sähkön kulutus [MWh]	Vuosihyötysuhde [-]	Sähkön kulutus [MWh]	Vuosihyötysuhde [-]
1	93,3	3,3	92,0	3,4	92,8	3,3
2	94,3	3,3	93,0	3,3	93,7	3,3
3	94,8	3,3	93,3	3,3	94,0	3,3
4	95,1	3,2	93,6	3,3	94,3	3,3
5	95,3	3,2	93,8	3,3	94,5	3,3
6	95,6	3,2	94,0	3,3	94,6	3,3
7	95,8	3,2	94,2	3,3	94,8	3,3
8	96,0	3,2	94,4	3,3	94,9	3,2
9	96,2	3,2	94,5	3,3	95,1	3,2
10	96,4	3,2	94,7	3,3	95,2	3,2
11	96,6	3,2	94,8	3,3	95,3	3,2
12	97,4	3,2	94,9	3,3	95,3	3,2
13	98,1	3,1	95,0	3,2	95,4	3,2
14	99,0	3,1	95,7	3,2	95,5	3,2
15	99,3	3,1	96,2	3,2	95,6	3,2
	Yhteensä	Keskiarvo	Yhteensä	Keskiarvo	Yhteensä	Keskiarvo
	1443,3	3,2	1414,1	3,3	1420,8	3,3

Kytettäessä ilmajäähdytin nostamaan energiakaivokentän lämmönsiirtonesteen lämpötilaa ennen maalämpöpumpun höyrystintä, saavutetaan lämmitysjärjestelmälle vain hieman parempi hyötysuhde kuin että ilmajäähdytin kytkettäisiin nostamaan energiakaivokenttään menevän lämmönsiirtonesteen lämpötilaa. Kytkentä 2:lla vaihtoehto 1 kuluttaa 0,4 % vähemmän sähköä kuin kytkentä 1, vaihtoehto 2 0,3 % ja vaihtoehto 3 0,2 % vähemmän sähköä. Yhden desimaalin tarkkuudella laskettuna vaihtoehtojen SCOP arvossa ei ole vaihtelua kytkentätapojen välillä.

## 8.3 Ilmalämpöjärjestelmät asuinkerrostalossa

Seuraavassa tarkastellaan ilmajäähdyttimien käyttämistä asuinkerrostalon maalämpöjärjestelmän lisälämmönlähteenä.

### 8.3.1 Apulaitteiden sähkön kulutus

Taulukossa 24 on esitetty asuinkerrostalon laskennassa käytettyjen apulaitteiden sähköteho. Kiertovesipumppujen mitoituksessa on käytetty Grundfos:n mitoitusohjelmaa [34]. Tarkemmat laskelmat ilmalämpöjärjestelmän painehäviöistä on esitetty liitteessä 2.

*Taulukko 24 Ilmalämpöjärjestelmällä varustetun maalämpöjärjestelmän apulaitteiden sähköteho.*

Sähkölaitteiden tehotiedot		
Sähkökattila max*	180	kW
Kiertovesipumppu energiakaivokentän keruupiiri**	0,75	kW
Ilmajäähdyn vaihtoehto 1 - Kiertovesipumppu 1	0,08	kW
Ilmajäähdyn vaihtoehto 2 - Kiertovesipumppu 1	0,21	kW
Ilmajäähdyn vaihtoehto 3 - Kiertovesipumppu 1	0,34	kW
Puhaltimien kokonaissähköteho - vaihtoehto 1	0,68	kW
Puhaltimien kokonaissähköteho - vaihtoehto 2	0,3	kW
Puhaltimien kokonaissähköteho - vaihtoehto 3	0,4	kW

\*Sähkökattila säätty portaattomasti rakennuksen energian tarpeen mukaan

\*\* Arvioitu 100 Pa/m, mitoittavan putkilenkin pituus 726 m ja mitoitusilavuusvirta 6,8 L/s

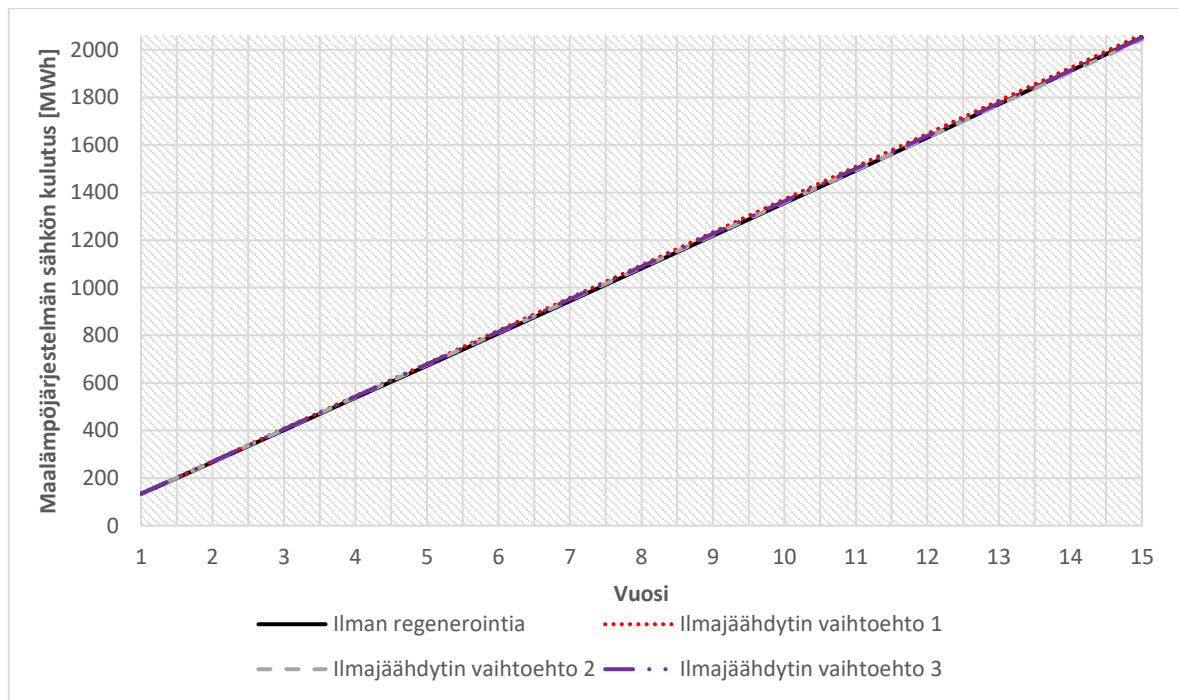
### 8.3.2 Ilmajäähdyttimet maalämpöjärjestelmän lisälämmönlähteenä

Taulukossa 25 on esitetty ilma- ja maalämpöjärjestelmän laskennallinen sähkökulutus ja vuosihyötysuhde 15 vuoden aikana kytkennällä 1.

*Taulukko 25 Asuinkerrostalon ilma- ja maalämpöjärjestelmän sähkön kulutus ja vuosihyötysuhde 15 vuoden aikana kolmella erikokoisella ilmajäähdyttimellä kytkennällä 1.*

Vuosi	Vaihtoehto 1		Vaihtoehto 2		Vaihtoehto 3	
	Sähkön kulutus [MWh]	SCOP [-]	Sähkön kulutus [MWh]	SCOP [-]	Sähkön kulutus [MWh]	SCOP [-]
1	135,0	3,7	133,9	3,8	134,5	3,7
2	136,2	3,7	135,0	3,7	135,6	3,7
3	136,6	3,7	135,4	3,7	135,9	3,7
4	136,9	3,7	135,7	3,7	136,2	3,7
5	137,2	3,7	135,9	3,7	136,4	3,7
6	137,4	3,7	136,1	3,7	136,6	3,7
7	137,7	3,6	136,2	3,7	136,8	3,7
8	137,8	3,6	136,4	3,7	136,9	3,7
9	138,0	3,6	136,6	3,7	137,1	3,7
10	138,2	3,6	136,7	3,7	137,2	3,7
11	138,3	3,6	136,8	3,7	137,3	3,7
12	138,4	3,6	137,0	3,7	137,4	3,7
13	138,6	3,6	137,1	3,7	137,5	3,7
14	138,7	3,6	137,2	3,7	137,6	3,6
15	138,8	3,6	137,3	3,7	137,6	3,6
	Yhteensä	Keskiarvo	Yhteensä	Keskiarvo	Yhteensä	Keskiarvo
	2064,1	3,6	2043,2	3,7	2050,5	3,7

Kuvassa 29 on esitetty ilmajäähdyttimillä varustetun maalämpöjärjestelmän laskennallinen sähkön kulutus 15 vuoden aikana.



Kuva 29 Asuinkerrostalon maalämpöjärjestelmän sähkön kumulatiivinen kulutus erikokoisilla ilmajäähdyttimillä regeneroituna sekä ilman regenerointia 15 vuoden aikana.

Kuten taulukosta 25 ja kuvasta 29 nähdään, ilmajäähdyttimien käyttö maalämpöjärjestelmän lisälämmönlähteenä ei merkitsevästi muuta maalämpöjärjestelmän sähkön kulutusta ilmajäähdyttimen koosta riippumatta.

Taulukossa 26 on esitetty ilma- ja maalämpöjärjestelmän laskennallinen sähkökulutus ja vuosihyötysuhde 15 vuoden aikana kytkennällä 2. Kuten aurinkokeräinten tapauksessa, myös ilmajäähdyttimien kohdalla kytkentä 2 vähentää hieman sähkön kulutusta verrattuna kytkentään 1. Kytkennällä saavutettu säästö on vain noin 3-4 MWh 15 vuoden aikana vaihtoehdosta riippuen.

*Taulukko 26 Asuinkerrostalon ilma- ja maalämpöjärjestelmän sähkön kulutus ja vuosihyötysuhde 15 vuoden aikana kolmella erikokoisella ilmajäähdyttimellä kytkennällä 2.*

	Vaihtoehto 1		Vaihtoehto 2		Vaihtoehto 3	
Vuosi	Sähkön kulutus [MWh]	SCOP [-]	Sähkön kulutus [MWh]	SCOP [-]	Sähkön kulutus [MWh]	SCOP [-]
1	134,9	3,7	133,7	3,8	134,3	3,7
2	136,0	3,7	134,8	3,7	135,3	3,7
3	136,4	3,7	135,2	3,7	135,7	3,7
4	136,8	3,7	135,5	3,7	135,9	3,7
5	137,1	3,7	135,7	3,7	136,2	3,7
6	137,3	3,7	135,9	3,7	136,3	3,7
7	137,5	3,7	136,1	3,7	136,5	3,7
8	137,7	3,6	136,2	3,7	136,6	3,7
9	137,8	3,6	136,4	3,7	136,8	3,7
10	138,0	3,6	136,5	3,7	136,9	3,7
11	138,1	3,6	136,6	3,7	137,0	3,7
12	138,2	3,6	136,7	3,7	137,1	3,7
13	138,4	3,6	136,8	3,7	137,2	3,7
14	138,5	3,6	136,9	3,7	137,3	3,7
15	138,6	3,6	137,0	3,7	137,4	3,7
	Yhteensä	Keskiarvo	Yhteensä	Keskiarvo	Yhteensä	Keskiarvo
	2061,2	3,7	2040,1	3,7	2046,5	3,7

## 9 Lisälämmönlähteiden kannattavuus

Aurinko- ja ilmalämpöjärjestelmien kannattavuuslaskelmat suoritettiin vain toimistorakennukselle. Asuinkerrostalon tapauksessa havaittiin, että vain osalla lasketuista lisälämmönlähteistä saavutettiin säästöjä maalämpöjärjestelmän sähkökuluissa. Lisäksi niissä tapauksissa, joissa sähkön kulutus vähentyi, olivat saavutetut sähkön säästöt todella pieniä. Näin ollen ei ole mielekästä suorittaa kannattavuuslaskelmia asuinkerrostalon kohdalla, koska järjestelmien takaisimaksuajat olisivat äärettömiä tai todella pitkiä.

Seuraavassa tarkastellaan järjestelmien investointikustannuksia, valittuja laskentaparametreja sekä järjestelmien elinkaarikustannuksia. Kaikki esitetyt hinnat ovat verottomia.

### 9.1 Investointikustannukset

Seuraavassa käsitellään toimistorakennuksen lisälämmönlähddejärjestelmien investointikustannuksia. Investointikustannukset perustuvat osittain laitetoimittajilta saatuihin hintoihin sekä omiin arvioihin.

#### 9.1.1 Tasokeräinjärjestelmän investointikustannukset

Laskennassa käytetyn tasokeräimen hinnaksi arvioitiin 250 euroa kappaleelta. Yhden keräimen asennushinnaksi arvioitiin 200 euroa kappaleelta. Kiertovesipumppujen hinnat perustuvat lähteeseen [34]. Taulukossa 27 on esitelty laskennan tasokeräinjärjestelmien investointikustannukset.

*Taulukko 27 Laskennoissa käytetyn tasokeräinjärjestelmien investointikustannukset.*

	Vaihtoehto 1	Vaihtoehto 2	Vaihtoehto 3
Tasokeräimet	5 750 €	11 500 €	17 250 €
Asennustyöt*	8 600 €	17 200 €	25 800 €
Putkityöt asennettuna**	5 850 €	7 670 €	10 790 €
Lämmönvaihdin***	1 300 €	1 500 €	2 000 €
Kiertovesipumppu 1	1 400 €	1 400 €	1 400 €
Kiertovesipumppu 2	1 400 €	1 400 €	1 400 €
Yhteensä	24 300 €	40 670 €	58 640 €

\* Arvioitu 200 €/keräin

\*\* Arvioitu 130 €/m sisältäen putken, eristeen ja asennuksen. Metrimäärät vaihtoehtoitain; vaihtoehto 1 45 m, vaihtoehto 2 59 m ja vaihtoehto 3 83 m. Metrimäärien muodostumisen näkee tarkemmin LIITE1:stä.

\*\*\* Arvioitu laskennan huipputehojen mukaan. Lämmönvaihtimien tehot seuraavasti; vaihtoehto 1 33 kW, vaihtoehto 2 65 kW ja vaihtoehto 3 96 kW

#### 9.1.2 Tyhjiökeräinjärjestelmän investointikustannukset

Laskennassa käytetyn tyhjiökeräimen hinnaksi arvioitiin 300 euroa kappaleelta. Yhden keräimen asennushinnaksi arvioitiin 200 euroa kappaleelta. Kiertovesipumppujen hinnat perustuvat lähteeseen [34]. Taulukossa 28 on esitelty laskennan tyhjiökeräinjärjestelmien investointikustannukset.

*Taulukko 28 Laskennoissa käytetyn tyhjiökeräinjärjestelmien investointikustannukset.*

	Vaihtoehto 1	Vaihtoehto 2	Vaihtoehto 3
Tyhjiökeräimet	13 800 €	27 600 €	41 400 €
Asennustyöt*	8 600 €	17 200 €	25 800 €
Putkityöt asennettuna**	7 670 €	10 790 €	15 990 €
Lämmönvaihdin***	1 300 €	1 500 €	2 000 €
Kiertovesipumppu 1	1 400 €	1 400 €	1 400 €
Kiertovesipumppu 2	1 400 €	1 400 €	1 400 €
<b>Yhteensä</b>	<b>34 170 €</b>	<b>59 890 €</b>	<b>87 990 €</b>

\* Arvioitu 200 €/keräin

\*\* Arvioitu 130 €/m sisältäen putken, eristeen ja asennuksen. Metrimäärät vaihtoehtoisin; vaihtoehto 1 45 m, vaihtoehto 2 59 m ja vaihtoehto 3 83 m. Metrimäärien muodostumisen näkee tarkemmin LIITE1:stä.

\*\*\* Arvioitu laskennan huipputehjojen mukaan. Lämmönvaihtimien tehot seuraavasti; vaihtoehto 1 33 kW, vaihtoehto 2 65 kW ja vaihtoehto 3 96 kW

### 9.1.3 Ilmalämpöjärjestelmän investointikustannukset

Laskennassa käytettyjen ilmajäähdytinpatterin hinta perustuu laitetoimittajan antamaan hintaan. Kiertovesipumppujen hinnat perustuvat lähteeseen [34]. Asennustöissä on arvioitu, että suuremmat vaihtoehdot ovat 500 euroa toisiaan kalliimpia johtuen putkikoon kasvusta. Taulukossa 29 on esitelty laskennan ilmalämpöjärjestelmien investointikustannukset.

*Taulukko 29 Laskennoissa käytetyn ilmalämpöjärjestelmien investointikustannukset.*

	Vaihtoehto 1	Vaihtoehto 2	Vaihtoehto 3
Ilmajäähdytinpatteri	3 070 €	3 280 €	3 400 €
Kiertovesipumppu 2	950 €	1 540 €	2 580 €
Asennustyöt*	4 000 €	4 500 €	5 000 €
<b>Yhteensä</b>	<b>8 020 €</b>	<b>9 320 €</b>	<b>10 980 €</b>

\* Arvio. Sisältää putkimateriaalit, anturit ja venttiilit sekä automaation

## 9.2 Laskentaparametrit

Elinkaarikustannusten laskentaparametreiksi valittiin taulukon 30 mukaiset arvot. Elinkaarikustannuksille tehtiin herkkyystarkastelu valitsemalla sähkön hinnan eskalaatiolle kolme erilaista skenaariota. Näitä skenaarioita kutsutaan jatkossa skenaario 1, skenaario 2 ja skenaario 3.

*Taulukko 30 Elinkaarilaskelmissa käytetyt lähtöarvot.*

Laskentaparametrit	
Nimelliskorkokanta	2 %
Inflaatio	1 %
Sähkön hinnan eskalaatio	
Skenaario 1	0 %
Skenaario 2	1 %
Skenaario 3	3 %
Sähkön hinta	
(€/MWh)	90

### 9.3 Elinkaarikustannukset

Elinkaarikustannuksissa huomioidaan maalämpöjärjestelmän lisälämmönlähteiden investointikustannukset sekä maalämpöjärjestelmän kuluttaman sähkön kustannukset. Huoltokustannukset ja mahdolliset laitteistojen uusimistarpeet jätetään elinkaarilaskemista pois. Elinkaarikustannusten laskennassa ei huomioida lisälämmönteitä käyttävien maalämpöjärjestelmien säästöjä verrattuna ilman lisälämmönlähdettä toimivaan maalämpöjärjestelmään. Jokaiselle tapauksella lasketaan omat elinkaarikustannukset 15 vuoden ajalta aikaisemmin esitellyin tiedoin.

Elinkaarikustannukset (Life Cycle Cost, LCC) lasketaan yhtälöllä (22)

$$LCC = \sum_{k=0}^n \frac{I_k}{(1+r)^k} + \sum_{k=1}^n \frac{K_k}{(1+r)^k}, \quad (22)$$

missä

$I_k$  on lisälämmönlähejärjestelmän investointikustannus [€]

$K_k$  on maalämpöjärjestelmän vuotuiset sähkön kustannukset [€/v]

$r$  on diskonttokorko [-]

$k$  on vuosi [v]

Diskonttokorko määritetään nimelliskorkokannan, inflaation ja sähkön hinnan eskalaation perusteella. Reaalikorko määritetään yhtälöllä (23) [35]

$$r = \frac{r_n - i}{1 + i}, \quad (23)$$

missä

$r_n$  on nimelliskorkokanta [-]

$i$  on inflaatio [-]

Diskonttokorko huomioiden sähkön hinnan eskalaatio määritetään yhtälöllä (24) [35]

$$r_e = \frac{r - e}{1 + e}, \quad (24)$$

missä

$r_e$  on reaalikorkokanta sähkön hinnalle, diskonttokorko [-]

$e$  on sähkön hinnan eskalaatio [-]

Taulukossa 31 on esitetty nykyisen maalämpöjärjestelmän elinkaarikustannukset 15 vuoden aikana kolmella eri sähkön hinnan eskalaatiolla ilman lisälämmönlähdettä.

*Taulukko 31 Toimistorakennuksen maalämpöjärjestelmän elinkaarikustannukset ilman lisälämmönlähteitä kolmella eri skenaariolla.*

	Skenaario 1	Skenaario 2	Skenaario 3
LCC	154 962 €	169 195 €	202 245 €



### 9.3.1 Tasokeräin

Taulukossa 32 on esitetty tasokeräinjärjestelmällä varustetun maalämpöjärjestelmän elinkaarikustannukset, takaisinmaksuaika ja säästöt verrattuna maalämpöjärjestelmään 15 vuoden tarkasteluajanjaksona kytkennällä 1 ja taulukossa 33 kytkennällä 2.

Takaisinmaksuaika (TMA) on määritetty kokeellisesti etsimällä se  $k$ :n arvo, joka toteuttaa yhtälön (25)

$$LCC_{MLP} - LCC_{LL-MLP} = \left[ \sum_{k=0}^n \frac{I_k}{(1+r)^k} + \sum_{k=1}^n \frac{K_k}{(1+r)^k} \right] - \left[ \sum_{k=0}^n \frac{I_k}{(1+r)^k} + \sum_{k=1}^n \frac{K_k}{(1+r)^k} \right] = 0, \quad (25)$$

missä

$LCC_{MLP}$

on maalämpöjärjestelmän elinkaarikustannukset [€]

$LCC_{LL-MLP}$

on lisälämmönlähteellä varustetun maalämpöjärjestelmän elinkaarikustannukset [€]

Takaisinmaksuaika

$$TMA = k, \quad (26)$$

missä

$TMA$

on lisälämmönlähteellä varustetun maalämpöjärjestelmän takaisinmaksuaika [v]

Lisälämmönlähdettä hyödyntävän maalämpöjärjestelmän elinkaarikustannuksissa saavutetut säästöt 15 vuoden aikana verrattuna ilman lisälämmönlähdettä toimivaan maalämpöjärjestelmään lasketaan yhtälöllä (27)

$$LCC_{säästöt} = LCC_{MLP} - LCC_{LL-MLP}, \quad (27)$$

missä

$LCC_{säästöt}$

on lisälämmönlähteellä varustetun maalämpöjärjestelmän säästöt elinkaarikustannuksissa verrattuna ilman lisälämmönlähdettä toimivaan maalämpöjärjestelmään.

*Taulukko 32 Tasokeräinjärjestelmällä varustetun maalämpöjärjestelmän elinkaarikustannukset, takaisinmaksuaika ja elinkaarikustannuksissa saavutetut säästöt 15 vuoden aikana verrattuna alkuperäiseen maalämpöjärjestelmään kytkennällä 1.*

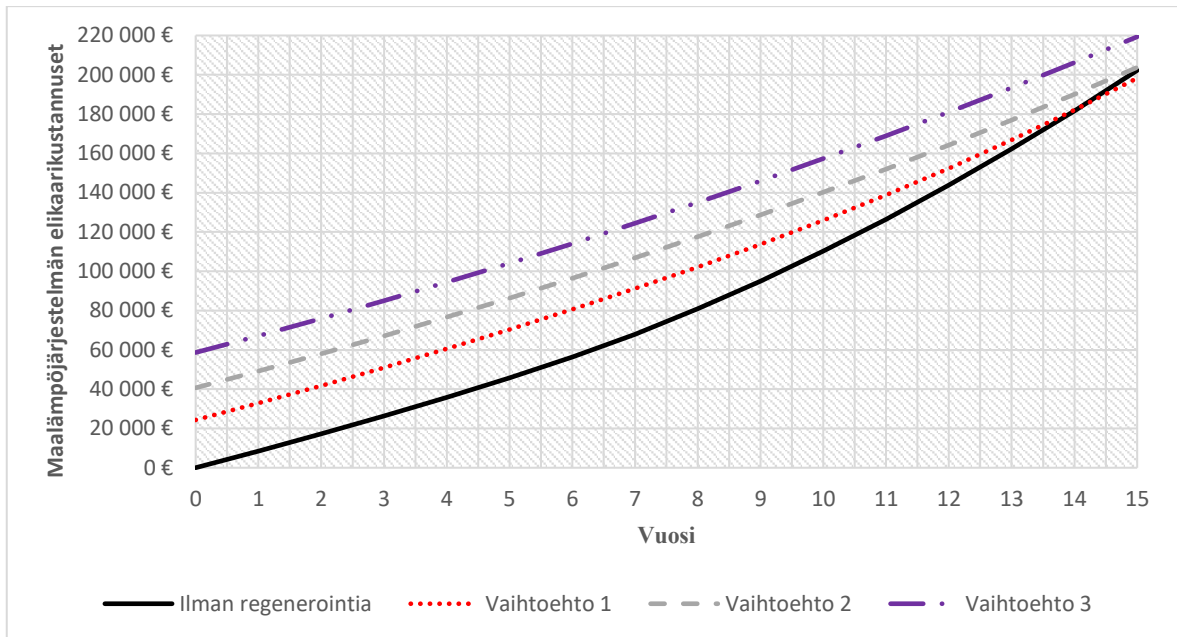
	Skenaario 1	Skenaario 2	Skenaario 3
<b>Vaihtoehto 1</b>			
LCC	159 331 €	171 088 €	198 285 €
TMA	>15	>15	14,1
LCC säästöt	-4 369 €	-1 893 €	3 960 €
<b>Vaihtoehto 2</b>			
LCC	168 128 €	178 907 €	203 765 €
TMA	>15	>15	>15
LCC säästöt	-13 166 €	-9 711 €	-1 520 €
<b>Vaihtoehto 3</b>			
LCC	184 362 €	194 947 €	219 350 €
TMA	>15	>15	>15
LCC säästöt	-29 400 €	-25 752 €	-17 106 €

*Taulukko 33 Tasokeräinjärjestelmällä varustetun maalämpöjärjestelmän elinkaarikustannukset, takaisinmaksuaika ja elinkaarikustannuksissa saavutetut säästöt 15 vuoden aikana verrattuna alkuperäiseen maalämpöjärjestelmään kytkennällä 2.*

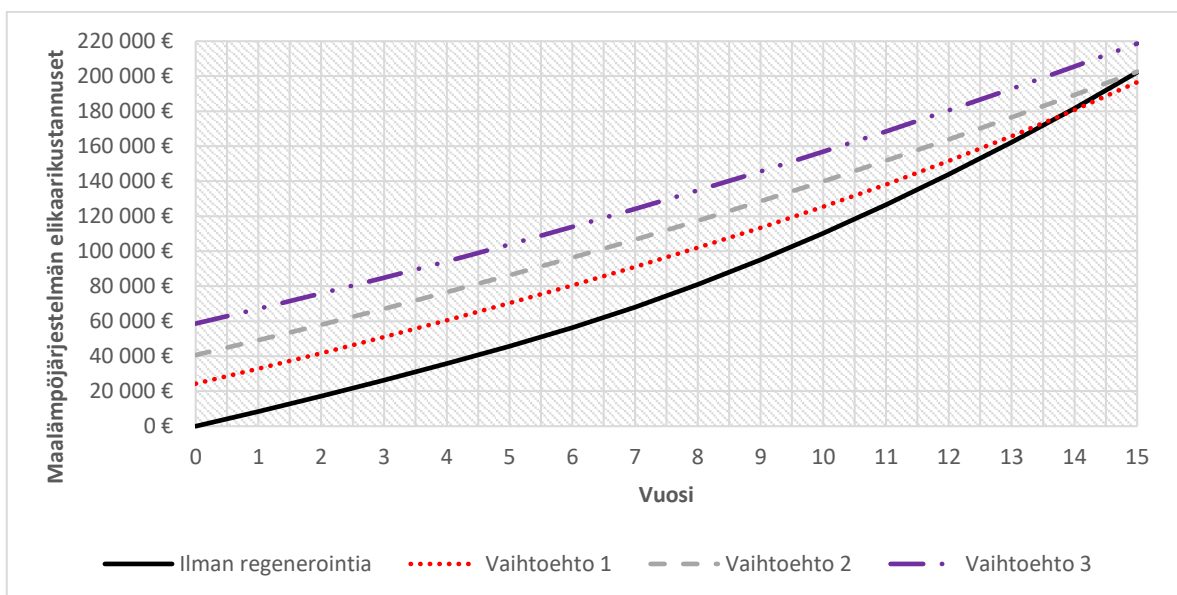
	Skenaario 1	Skenaario 2	Skenaario 3
<b>Vaihtoehto 1</b>			
LCC	158 117 €	169 722 €	196 559 €
TMA	>15	>15	13,8
LCC säästöt	-3 155 €	-527 €	5 686 €
<b>Vaihtoehto 2</b>			
LCC	167 295 €	177 974 €	202 593 €
TMA	>15	>15	>15
LCC säästöt	-12 333 €	-8 778 €	-348 €
<b>Vaihtoehto 3</b>			
LCC	183 810 €	194 349 €	218 644 €
TMA	>15	>15	>15
LCC säästöt	-28 848 €	-25 154 €	-16 399 €

Kuten taulukoista 32 ja 33 nähdään, tasokeräinjärjestelmällä varustettu maalämpöjärjestelmä on kannattava vain vaihtoehdon 1 skenaario 3:lla valitulla tarkastelujaksolla kytkentätavasta riippumatta. Tällöin takaisinmaksuaika on 14,1 vuotta. Kytkennän 2 elinkaarikustannukset ovat hieman pienemmät, ja takaisinmaksuaika 0,3 vuotta lyhyempi kuin kytkennän 1.

Kuvissa 30 ja 31 on esitetty skenaario 3:n elinkaarikustannusten kumulatiivinen kertyminen kaikille vaihtoehdoille 15 vuoden aikana kytkennällä 1 ja 2.



Kuva 30 Tasokeräin-maalämpöjärjestelmän skenaario 3:n elinkaarikustannukset 15 vuoden aikana kytkennällä 1.



Kuva 31 Tasokeräin-maalämpöjärjestelmän skenaario 3:n elinkaarikustannukset 15 vuoden aikana kytkennällä 2.

### 9.3.2 Tyhjiökeräin

Taulukossa 34 on esitetty tyhjiökeräimellä varustetun maalämpöjärjestelmän elinkaarikustannukset, takaisinmaksuaika ja säästöt verrattuna maalämpöjärjestelmään 15 vuoden tarkasteluajanjaksona kytkennällä 1.

*Taulukko 34 Tyhjiökeräinjärjestelmällä varustetun maalämpöjärjestelmän elinkaarikustannukset, takaisinmaksuaika ja elinkaarikustannuksissa saavutetut säästöt 15 vuoden aikana verrattuna alkuperäiseen maalämpöjärjestelmään kytkennällä 1.*

	Skenaario 1	Skenaario 2	Skenaario 3
<b>Vaihtoehto 1</b>			
LCC	170 540 €	182 471 €	210 081 €
TMA	>15	>15	>15
LCC säästöt	-15 578 €	-13 276 €	-7 836 €
<b>Vaihtoehto 2</b>			
LCC	188 042 €	198 906 €	223 969 €
TMA	>15	>15	>15
LCC säästöt	-33 079 €	-29 710 €	-21 724 €
<b>Vaihtoehto 3</b>			
LCC	214 117 €	224 745 €	249 246 €
TMA	>15	>15	>15
LCC säästöt	-59 155 €	-55 549 €	-47 001 €

Kuten taulukosta 34 nähdään, tyhjiökeräinjärjestelmän lisääminen toimistorakennuksen maalämpöjärjestelmän lisälämmönlähteeksi ei ole millään vaihtoehdolla eikä skenaariolla laskennallisesti kannattavaa 15 vuoden tarkasteluajanjaksona.

### 9.3.3 Ilmalämpöjärjestelmä

Taulukossa 35 on esitetty ilmalämpöjärjestelmällä varustetun maalämpöjärjestelmän elinkaarikustannukset, takaisinmaksuaika ja säästöt verrattuna maalämpöjärjestelmään 15 vuoden tarkasteluajanjaksona kytkennällä 1 ja taulukossa 36 kytkennällä 2.

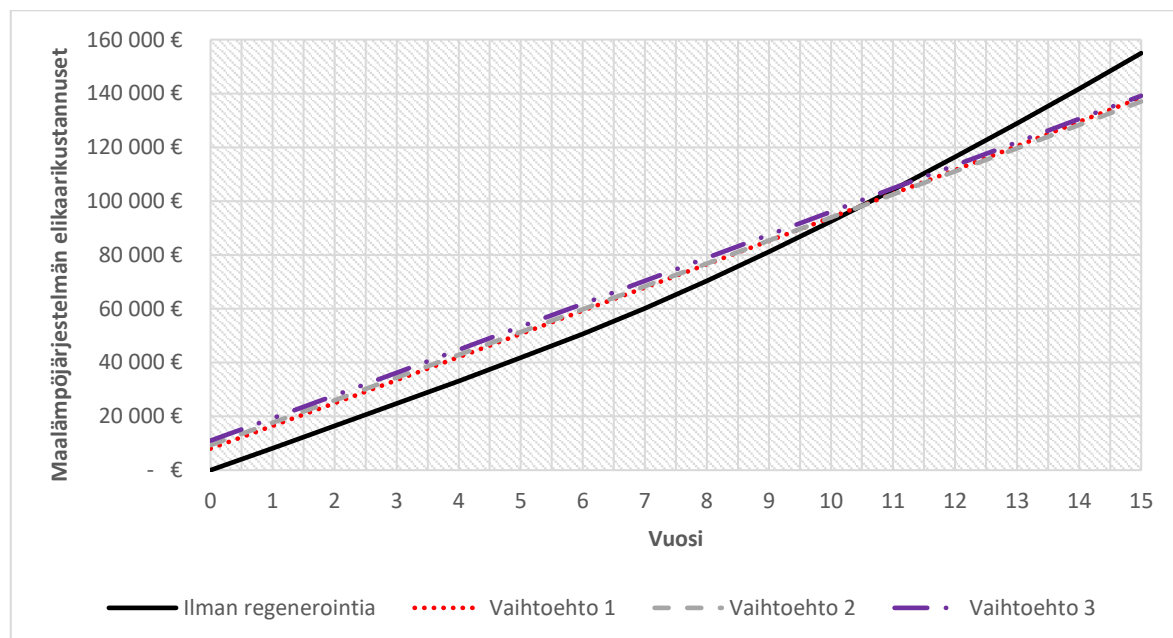
*Taulukko 35 Ilmalämpöjärjestelmällä varustetun maalämpöjärjestelmän elinkaarikustannukset, takaisinmaksuaika ja elinkaarikustannuksissa saavutetut säästöt 15 vuoden aikana verrattuna alkuperäiseen maalämpöjärjestelmään kytkennällä 1.*

	Skenaario 1	Skenaario 2	Skenaario 3
<b>Vaihtoehto 1</b>			
LCC	138 436 €	149 487 €	174 979 €
TMA	10,5	10,2	9,7
LCC säästöt	16 526 €	19 708 €	27 266 €
<b>Vaihtoehto 2</b>			
LCC	137 018 €	147 801 €	172 666 €
TMA	10,4	10,2	9,7
LCC säästöt	17 944 €	21 394 €	29 579 €
<b>Vaihtoehto 3</b>			
LCC	139 115 €	149 906 €	174 782 €
TMA	11,1	10,8	10,3
LCC säästöt	15 847 €	19 289 €	27 463 €

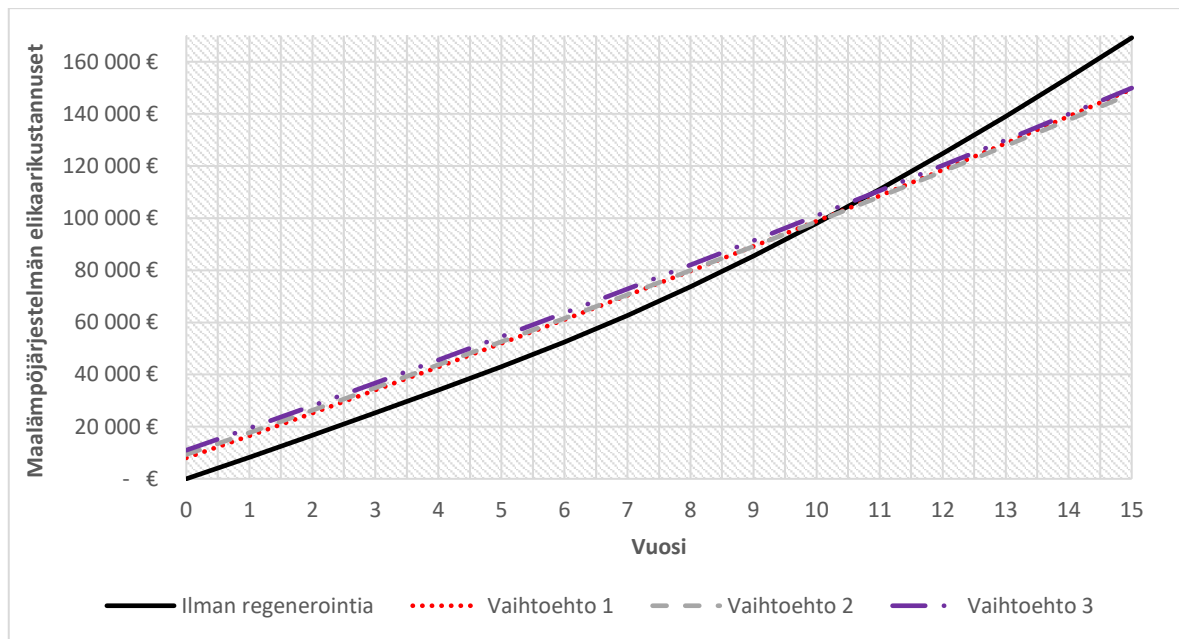
*Taulukko 36 Ilmalämpöpöjärjestelmällä varustetun maalämpöpöjärjestelmän elinkaarikustannukset, takaisinmaksuaika ja elinkaarikustannuksissa saavutetut säästöt 15 vuoden aikana verrattuna alkuperäiseen maalämpöpöjärjestelmään kytkenällä 2.*

	Skenaario 1	Skenaario 2	Skenaario 3
<b>Vaihtoehto 1</b>			
LCC	137 908 €	148 899 €	174 250 €
TMA	10,4	10,2	9,8
LCC säästöt	17 054 €	20 296 €	27 994 €
<b>Vaihtoehto 2</b>			
LCC	136 589 €	147 323 €	172 074 €
TMA	10,4	10,2	9,7
LCC säästöt	18 373 €	21 872 €	30 170 €
<b>Vaihtoehto 3</b>			
LCC	138 870 €	149 638 €	174 462 €
TMA	11,1	10,8	10,3
LCC säästöt	16 092 €	19 557 €	27 783 €

Laskennassa käytetyt ilmajäähdyttimet ovat kaikilla vaihtoehdoilla ja skenaarioilla kannattavia 15 vuoden tarkastelujaksolla. Kannattavin on vaihtoehto 2, jonka takaisinmaksuaika vaihtelee 10,4 vuodesta 9,7 vuoteen skenaarion 1 ja 3 välillä. Kannattomin on vaihtoehto 3. KytKentä 2 tuottaa hieman paremmat elinkaarisäästöt kuin kytKentä 1. Kuvissa 32 ja 33 on esitetty ulkoilman lämpöä hyödyntävän maalämpöpöjärjestelmän kumulatiiviset elinkaarikustannukset 15 vuoden aikana skenaarioille 1 ja 2 kytkenällä 1.



*Kuva 32 Ilmajäähdytin-maalämpöpöjärjestelmän skenaario 1:n elinkaarikustannukset 15 vuoden aikana kytkenällä 1.*



Kuva 33 Ilmajäähdytin-maalämpöjärjestelmän skenaario 1:n elinkaarikustannukset 15 vuoden aikana kytkennällä 2.

## 10 Tulosten analysointi

Seuraavassa analysoidaan lisälämpöratkaisujen vaikutusta maalämpöjärjestelmän sähkön kulutukseen ja elinkaarikustannuksiin sekä vertaillaan lyhyesti aurinko- ja ilmalämpöjärjestelmien lämpöenergian tuottoa. Tarkasteltavia lisälämmönlähteitä olivat pinta-alaltaan erikoiset taso- ja tyhjiökeräin sekä teholtaan erikokoiset ilmajäähdyttimet. Eri vaihtoehtojen nimitykset on esitetty taulukossa 37.

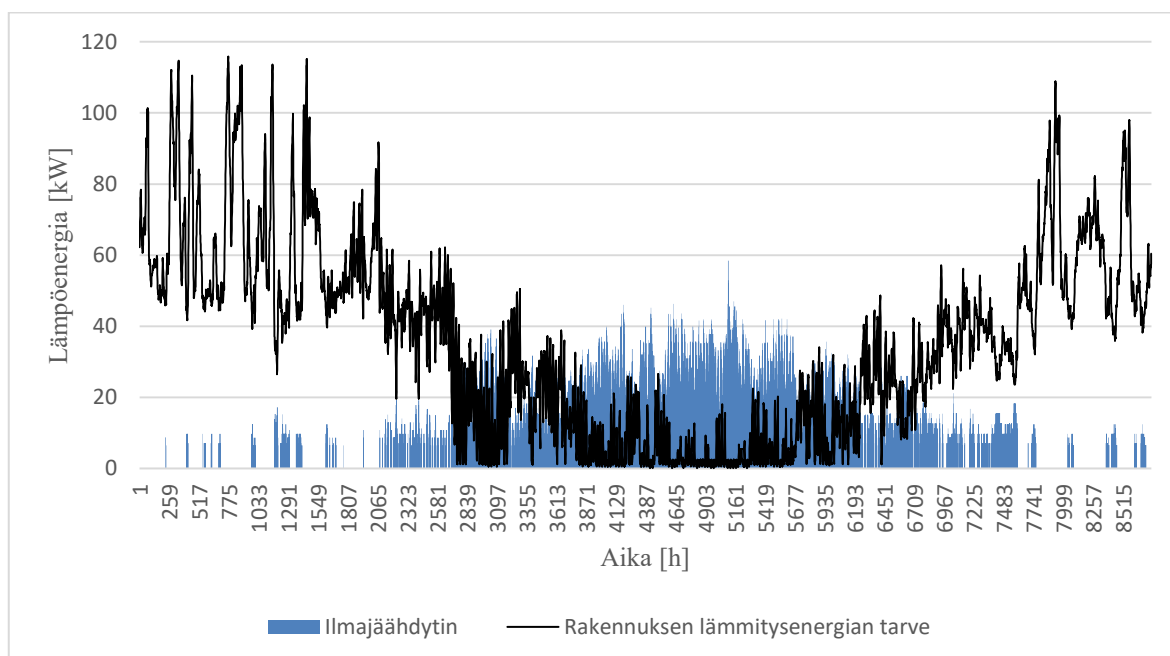
*Taulukko 37 Lisälämmönlähteiden eri vaihtoehdot, ja aurinkokeräinvaihtoehtojen apertuuripinta-ala sekä ilmajäähdyttimien nimellislämpöteho (taulukko 20).*

	Vaihtoehto 1	Vaihtoehto 2	Vaihtoehto 3	
Tasokeräin	129	86	43	m <sup>2</sup>
Tyhjiökeräin	129	86	43	m <sup>2</sup>
Ilmajäähdytin	30,4	32,7	44,5	kW

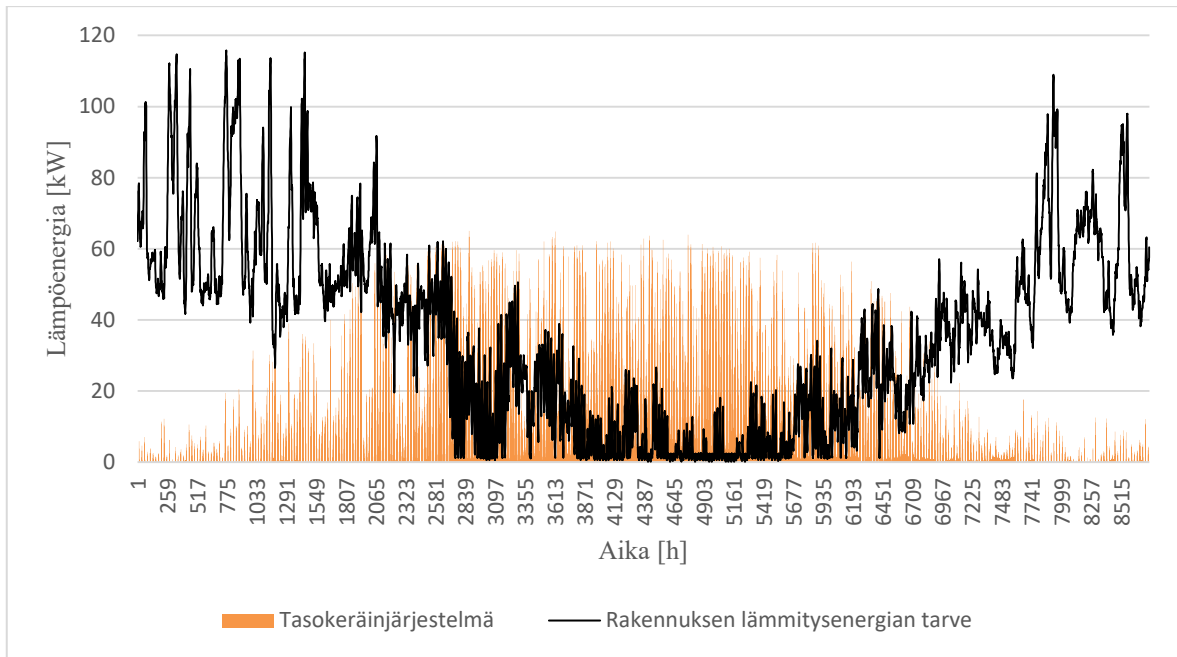
Lisäksi lisälämmönlähteiden käyttöä maalämpöjärjestelmän rinnalla tarkasteltiin kahdella eri kytkentävaihtoehdolla. Kytkennällä 1 lisälämmönlähteen tuottama lämpöenergia ohjattiin energiakaivokenttään menevään lämmönsiirtonesteeseen. Kytkennällä 2 lisälämmönlähteen tuottama lämpöenergia ohjattiin maalämpöpumpun höyrystimelle menevään lämmönsiirtonesteeseen.

### 10.1 Lisäenergialähteiden tuottama lämpöenergia

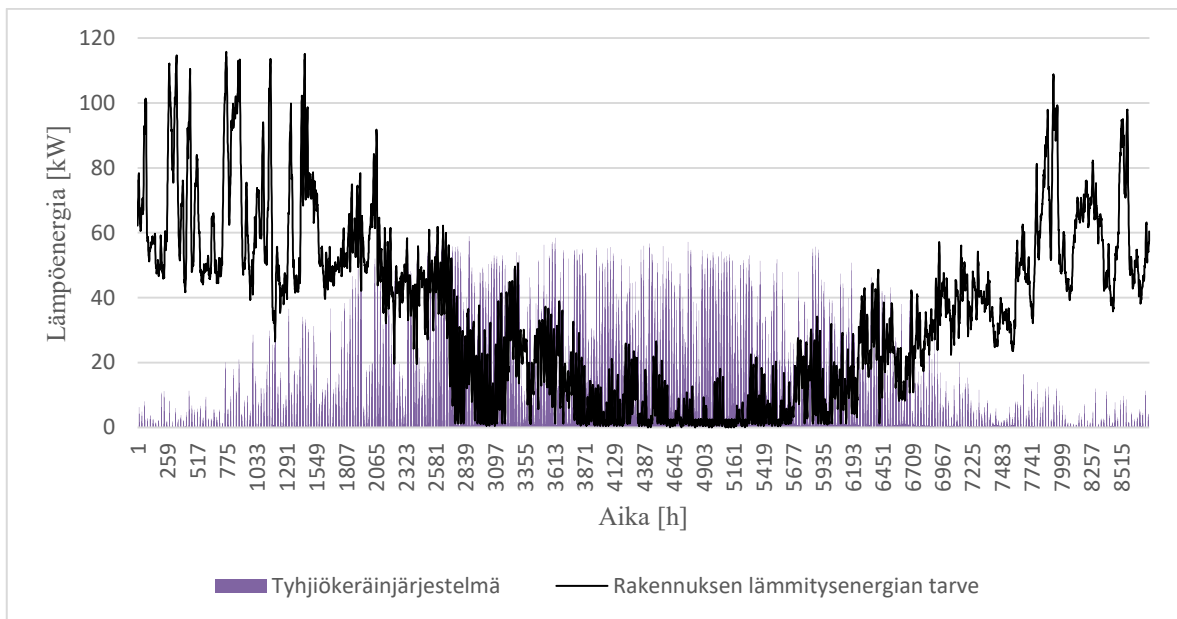
Kuvassa 34, 35 ja 36 on esitetty toimistorakennuksen ilmajäähdyttimen, tasokeräinjärjestelmän ja tyhjiökeräinjärjestelmän vaihtoehto 2:n tuottama tuntikohtainen lämpöteho laskennan 15 vuoden aikana. Esitetyt järjestelmien lämpötehot ovat laskettu kytkennällä 1. Lisäksi kuvissa on esitetty toimistorakennuksen tuntikohtainen lämmitysenergian tarve.



*Kuva 34 Toimistorakennuksen ilmajäähdytin vaihtoehdon 2 tuottama lämpöenergia tuntikohtaisesti kytkennällä 1 laskentajakson viimeisenä vuotena.*



Kuva 35 Toimistorakennuksen tasokeräinjärjestelmän vaihtoehdon 2 tuottama lämpöenergia tuntikohtaisesti kytkennällä 1 laskentajakson viimeisenä vuotena.



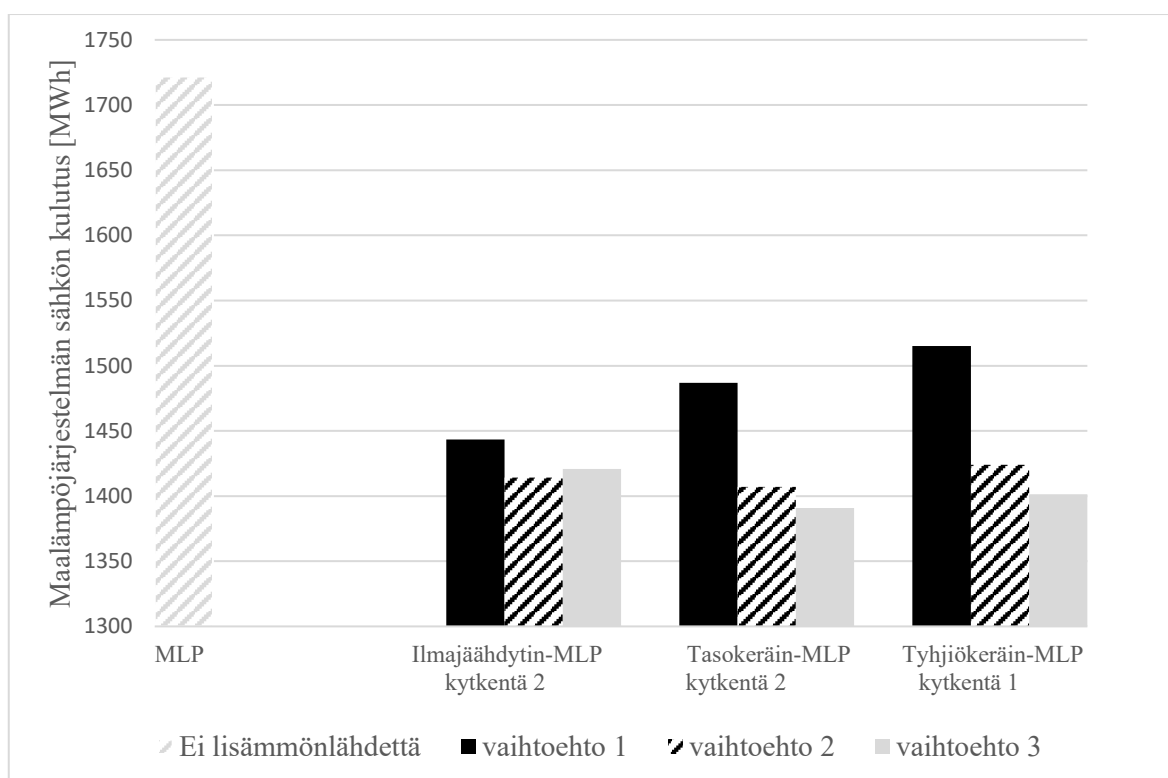
Kuva 36 Toimistorakennuksen tyhjiökeräinjärjestelmän vaihtoehdon 2 tuottama lämpöenergia tuntikohtaisesti kytkennällä 1 laskentajakson viimeisenä vuotena.

Kuten kuvista 34, 35 ja 36 nähdään, ilmajäähdyttimen tuottama lämpöenergia painottuu enemmän kevään ja syksyn väliselle ajalle, kun taas aurinkokeräimistä on mahdollista saada lämpöenergiaa myös talvella. Jotta aurinkokeräimet tuottavat lämpöenergiaa myös talvella, täytyy niiden olla puhtaana lumesta. Toisaalta ilmajäähdytin tuottaa lämpöenergiaa paljon tasaisemmin kuin taso- ja tyhjiökeräin, joiden tuotto noudattaa auringon päivittäistä nousu- ja laskurytmiä. Kuvassa 34 esitetyn ilmajäähdyttimen tuottama lämpöenergian määrä on 104,4 MWh, kuvassa 35 esitetyn tasokeräimen 87,6 MWh ja kuvassa 36 esitetyn tyhjiökeräimen 77,2 MWh.



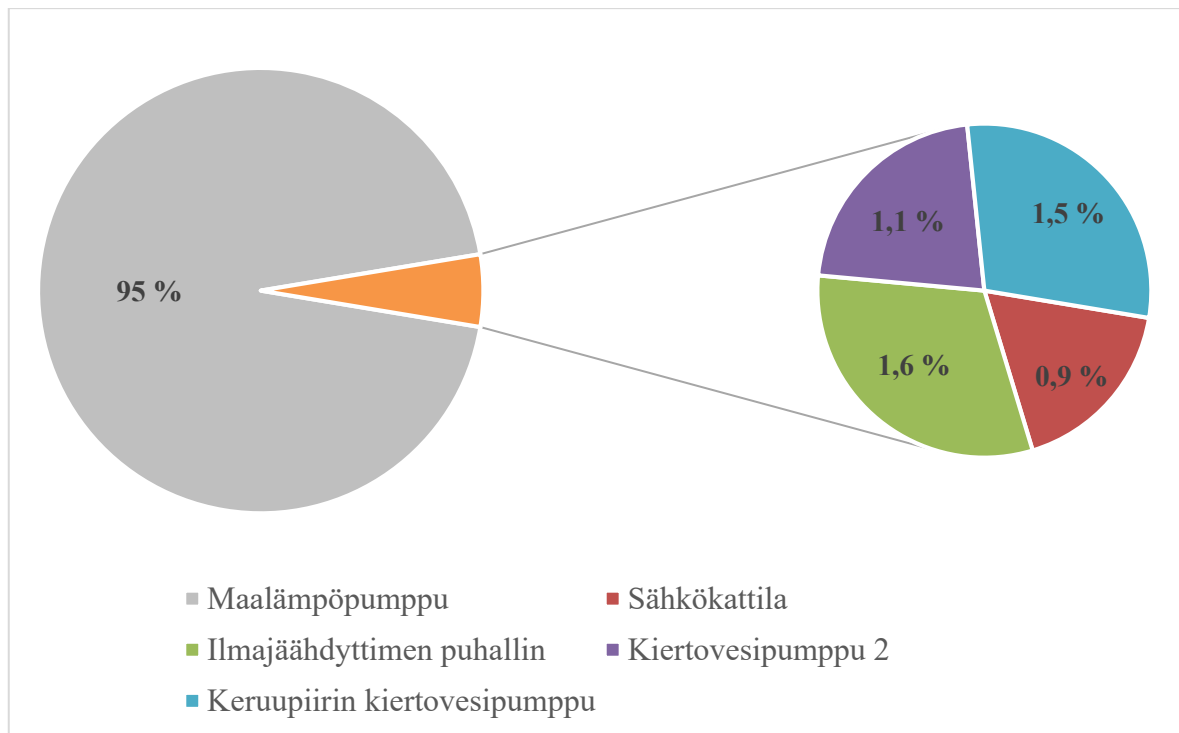
## 10.2 Sähkön kulutukset

Toimistorakennuksen osalta vähiten sähköä kulutti kytkennällä 2 tasokeräin-maalämpöjärjestelmän vaihtoehto 3. Kyseinen järjestelmä sisälsi 69 tasokeräintä ja tasokeräimien tuottama lämpö ohjattiin maalämpöpumpun höyrystimelle menevään lämmönsiirtonesteeseen. Kuten kuvasta 37 nähdään, lähes samaan sähkön kokonaiskulutukseen päädyttiin tyhjiökeräin-maalämpöjärjestelmän vaihtoehto 3:n kytkennällä 1 ja ilmajäähdytin-maalämpöjärjestelmän vaihtoehto 2:n kytkennällä 2. Kuvasta 37 nähdään, että aurinkokeräinten osalta sähkön kokonaiskulutus väheni järjestelmän koon kasvaessa. Toisaalta vaihtoehdon 2 ja 3 välillä sähkön kulutus ei enää vähentynyt juurikaan, vaikka järjestelmiä kasvatettiin samassa suhteessa vaihtoehtojen välillä. Ilmajäähdytin-maalämpöjärjestelmien kohdalla sähkön kokonaiskulutus kääntyi kasvuun vaihtoehdon 2 ja 3 välillä.



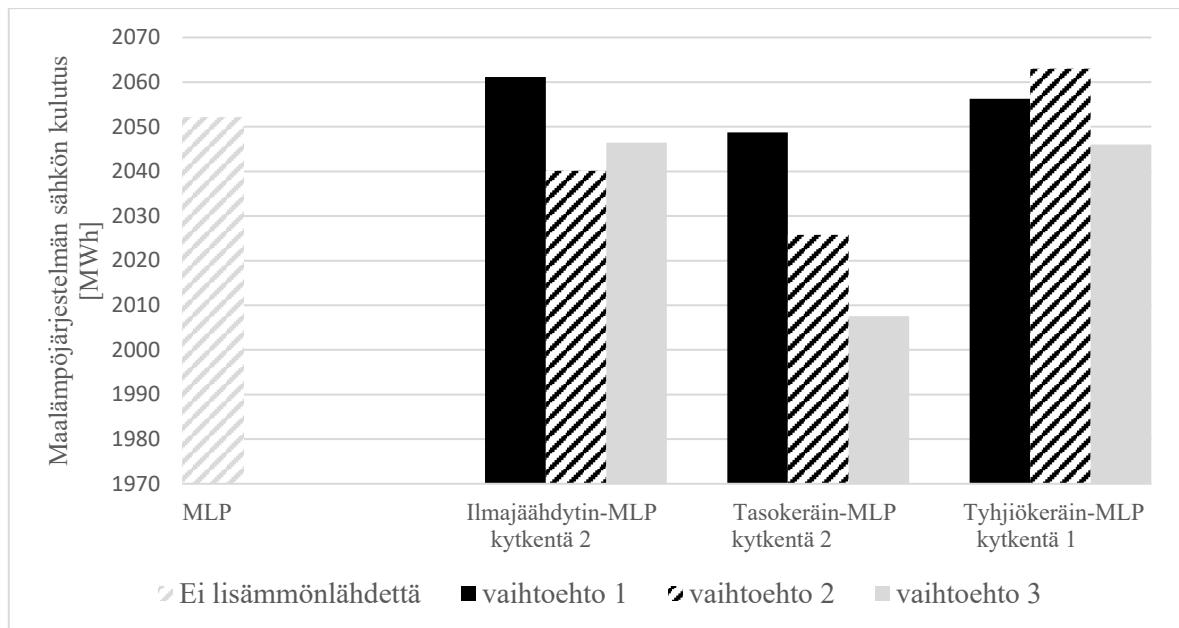
Kuva 37 Toimistorakennuksen maalämpöjärjestelmän sähkön kulutus 15 vuoden aikana ilman lisälämmönlähdettä sekä eri lisälämmönlähteillä varustettuna.

Kuvassa 38 on esitetty toimistorakennuksen kytkennällä 1 ilmajäähdytin-maalämpöjärjestelmän vaihtoehto 2:n sähkön kulutuksen jakautuminen eri laitteiden kesken 15 vuoden tarkastelujaksolla. Kyseinen järjestelmä oli elinkaarikustannuksiltaan edullisin vaihtoehto kytkennällä 1. Kuten kuvasta nähdään, maalämpöpumpun kompressorin kuluttaa ylivoimaisesti suurimman osan (95 %) järjestelmän sähköstä. Seuraavaksi eniten sähköä kuluttavat suuruusjärjestyksessä ilmajäähdytinien puhaltimet (1,6 %), keruupiirin kiertovesipumppu (1,5 %), kiertovesipumppu 2 (1,1 %) ja sähkökattila (0,9 %). Ilmajäähdytinien komponenttien sähkön kulutus on varsin maltillinen (2,8 %) koko järjestelmän sähkön kulutukseen nähden.



*Kuva 38 Kytken 1 ilmalämpö-maalämpöjärjestelmä vaihtoehto 2:n sähkön kulutuksen jakautuminen järjestelmän laitteiden kesken 15 vuoden aikana.*

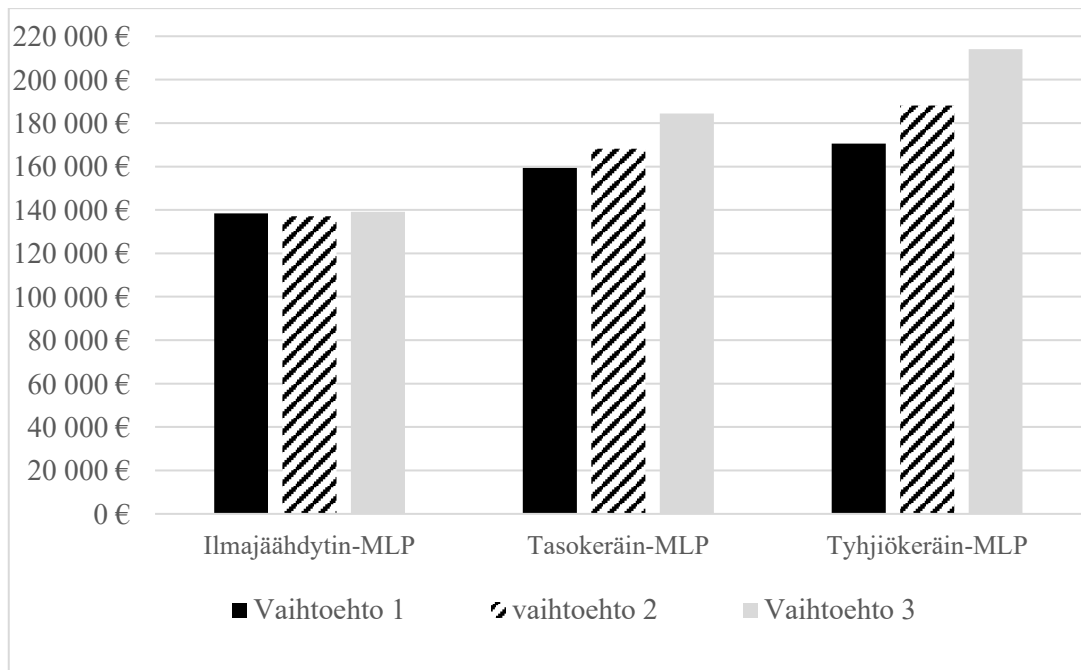
Asuinkerrostalon kohdalla vähintään sähkö kulutti toimistorakennuksen tavoin kytken 2 tasokeräin-maalämpöjärjestelmän vaihtoehto 3. Saavutettu säästö sähkön kulutuksessa on kuitenkin hyvin pieni verrattuna toimistorakennuksen tapaukseen. Kuten kuvasta 39 nähdään, tasokeräimien kohdalla sähkön kulutus pienenee järjestelmän koon kasvaessa, mutta tyhjiökeräimien kohdalla näin ei tapahdu. Tämä johtunee siitä, että tyhjiökeräin vaihtoehtojen 2 ja 3 järjestelmissä on kaksi kiertovesipumppua. Ilmalämpöjärjestelmän kohdalla vaihtoehto 2 kuluttaa vähiten sähköä. Asuinkerrostalon kohdalla ilmalämpöjärjestelmän vaihtoehto 1 ja tyhjiökeräinjärjestelmien vaihtoehdot 1 ja 2 kuluttavat enemmän sähköä kuin maalämpöjärjestelmä ilman lisälämmönlähdettä.



Kuva 39 Asuinkerrostalon maalämpöjärjestelmän sähkön kulutus 15 vuoden aikana ilman lisälämmönlähdettä sekä eri lisälämmönlähteillä varustettuna.

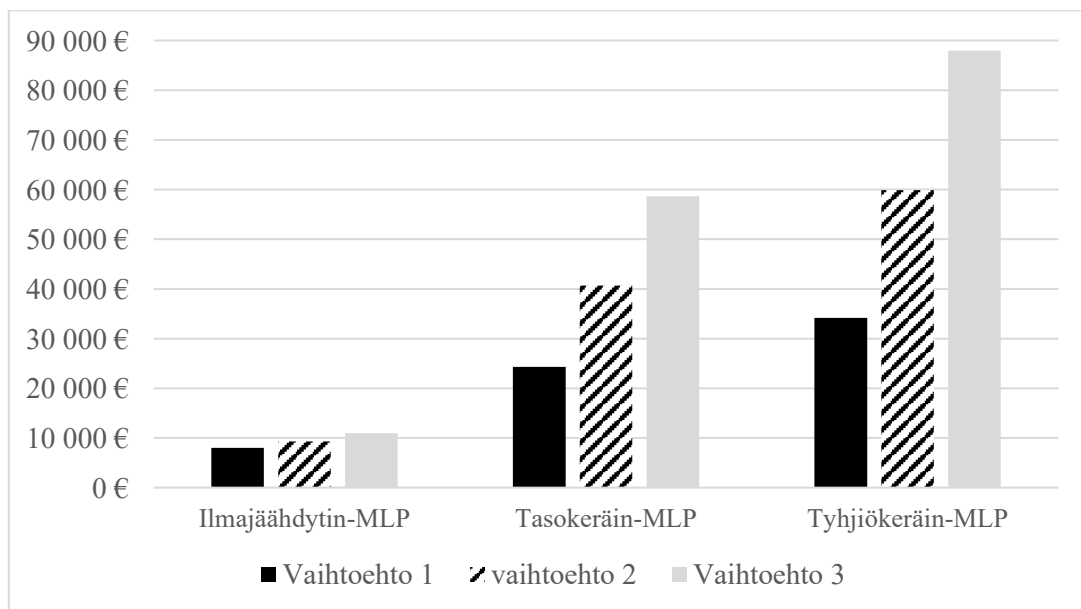
### 10.3 Elinkaarikustannukset

Elinkaarilaskelmien tuloksena ilmajäähdytin-maalämpöjärjestelmän vaihtoehto 2 kytkennällä 2 on edullisin vaihtoehto toimistorakennuksen kohdalla kaikilla sähkön hinnan eskalaation skenaarioilla. Seuraavaksi pienimmät elinkaarikustannukset ovat ilmajäähdytin-maalämpöjärjestelmien vaihtoehtoilla 1 ja 3. Kuvassa 40 on kuvattu ilmajäähdytin-, tasokeräin- ja tyhjiökeräin-maalämpöjärjestelmän järjestelmien elinkaarikustannukset kytkennällä 1 ja sähkön eskalaatiolla 0 %. Elinkaarilaskujen perusteella voidaan todeta, että ilmajäähdytin-maalämpöjärjestelmät ovat edullisimmat vaihtoehdot. Seuraavaksi edullisimmat vaihtoehdot ovat tasokeräin-maalämpöjärjestelmät ja kalleimmat ovat tyhjiökeräin-maalämpöjärjestelmät.



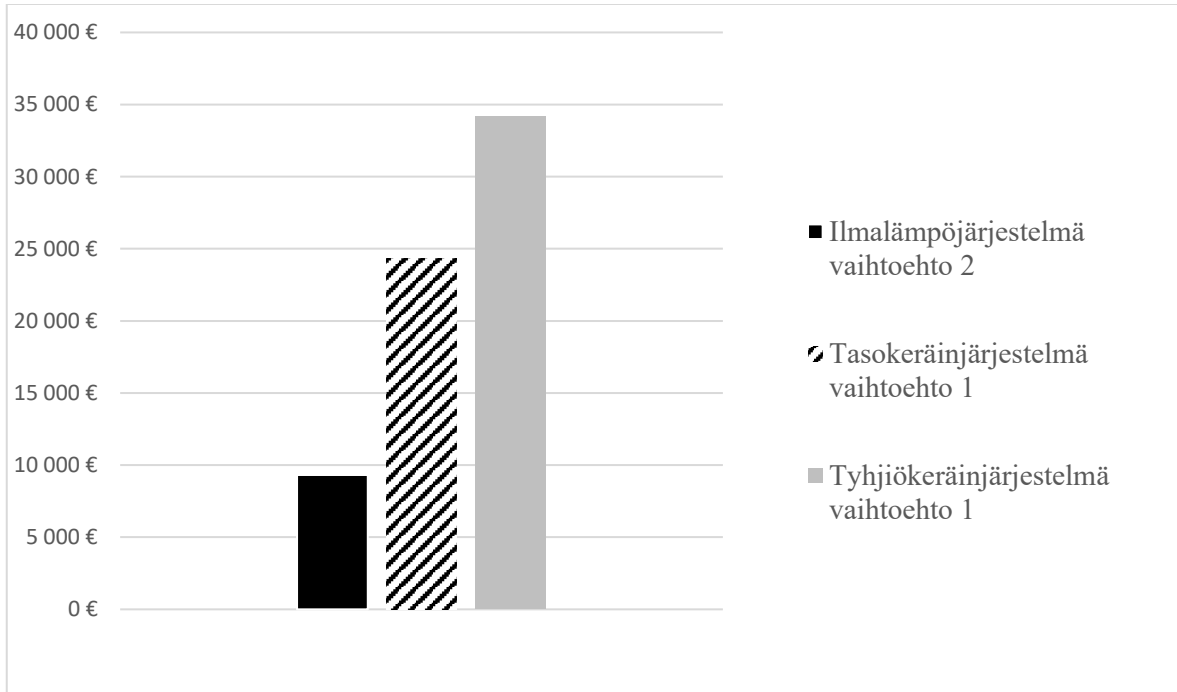
Kuva 40 Ilmalämpö-, tasokeräin- ja tyhjiökeräinjärjestelmällä (kytkentä 1) varustetun maa-lämpöjärjestelmän elinkaarikustannukset 15 vuoden aikana sähkön hinnan eskalaation ol-lessa 0%.

Elinkaarikustannusten erot eri järjestelmien välillä selittyvät suurimmilta osin järjestelmien investointikustannuksista. Kuvassa 41 on näytetty järjestelmien eri vaihtoehtojen investoin-tikustannukset. Järjestelmien investointikustannusten erot näkyvät samankaltaisina kuin ku-van 40 elinkaarikustannuksissa. Toisin sanoen järjestelmien käyttökustannuksissa ei ole suurta eroa, vaan elinkaarikustannusten ero syntyy pääosin järjestelmien investointikustan-nuksista.



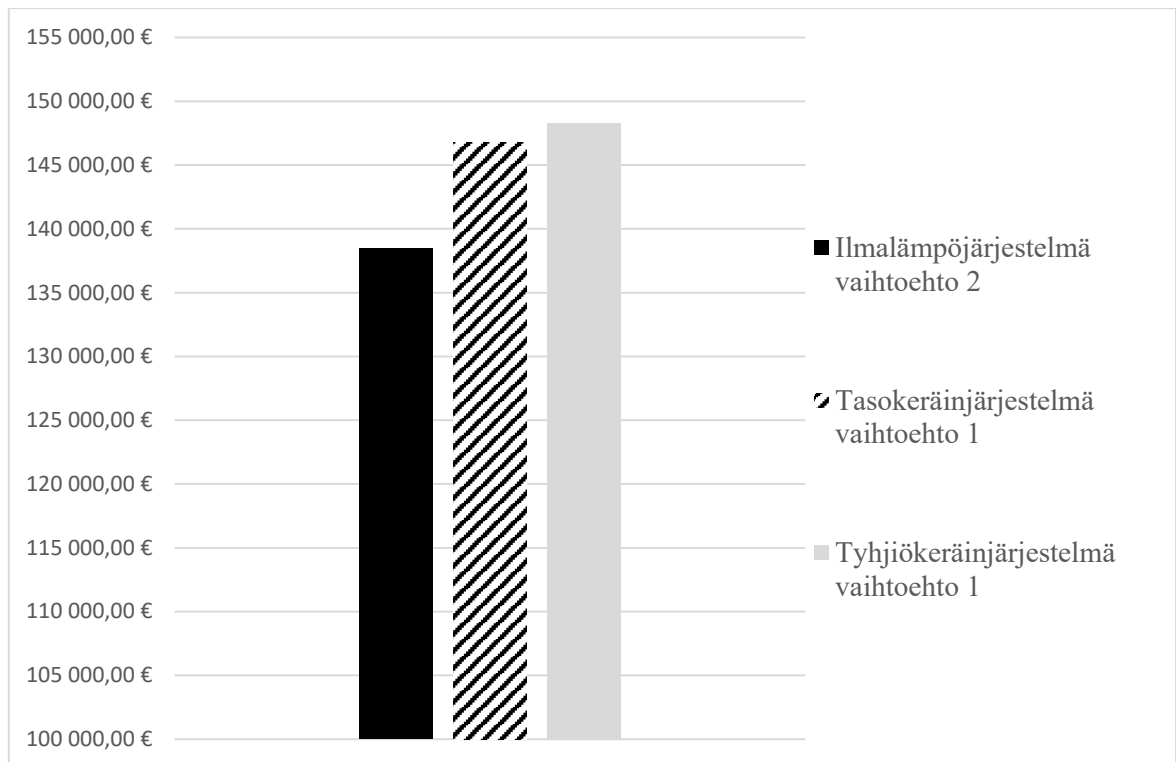
Kuva 41 Toimistorakennuksen laskennassa käytettyjen ilma-, tasokeräin- ja tyhjiökeräinjär-jestelmien investointikustannukset.

Kuvassa 42 on esitetty elinkaarikustannuksiltaan edullisimpien ilmalämpö-, tasokeräin- ja tyhjiökeräinjärjestelmän investointikustannukset ja kuvassa 43 samojen järjestelmien käyttökustannukset kytkennällä 1 ja sähkön hinnan eskalaatiolla 1 % 15 vuoden aikana. Tasokeräinjärjestelmän investointikustannukset ovat 161 % (14 980 €) ja tyhjiökeräinjärjestelmän 267 % (24 850 €) suuremmat kuin ilmalämpöjärjestelmän.



Kuva 42 Elinkaarikustannuksiltaan edullisimpien ilma-, taso- ja tyhjiökeräinjärjestelmän investointikustannukset (kytkentä 1).

Samojen järjestelmien käyttökustannuksissa tasokeräinjärjestelmän käyttökustannukset ovat 6 % (8 307 €) ja tyhjiökeräinjärjestelmän 7 % (9 820 €) suuremmat kuin ilmalämpöjärjestelmän. Yhteenvetona voidaan sanoa, että tarkasteltaessa tässä työssä käytettyjen eri järjestelmien parhaita vaihtoehtoja elinkaarikustannuksiltaan, ilmalämpöjärjestelmä on sekä investointi että käyttökustannuksiltaan edullisin vaihtoehto.



*Kuva 43 Elinkaarikustannuksiltaan edullisimpien ilma-, taso- ja tyhjiökeräinjärjestelmän käyttökustannukset 15 vuoden tarkasteluajanjakson aikana (kytkentä 1, eskalaatio 1 %).*

## 11 Yhteenveto

Tämän työn tavoitteena oli saada selville, onko aurinko- tai ilmalämpöpöjärjestelmän asentaminen maalämpöpöjärjestelmän lisäenergialähteeksi taloudellisesti kannattavaa tarkasteltaessa järjestelmän elinkaarikustannuksia. Taloudellista kannattavuutta arvioitiin kahden olemassa olevan rakennuksen kohdalla, joiden lämmitysjärjestelmänä on maalämpö. Toinen rakennuksista on toimistorakennusta ja toinen asuinkerrostalo. Kannattavuutta pyrittiin arvioimaan erikokoisilla lisälämmönlähddejärjestelmillä. Lisäksi työn tavoitteena oli saada selville, onko lisälämpöenergia taloudellisesti kannattavampaa ohjata kaivokenttään menevään lämmönsiirtonesteeseen eli regeneroida energiakaivokenttää vai nostaa ensisijaisesti energiakaivokentästä palaavan lämmönsiirtonesteen lämpötilaa ennen maalämpöpumpun höyrystintä.

Työn teoriaosuudessa käsiteltiin maalämpöpöjärjestelmän lämmönlähdettä eli maankamaraa lämmönlähteenä, maankamaran regenerointia sekä tässä työssä regenerointilähteenä käytettyjä aurinko- ja ilmalämpöpöjärjestelmiä. Teoriaosuuden perusteella ymmärretään maankamaran tärkeimmät huomioon otettavat fysikaaliset parametrit ja seikat mitoitettaessa maalämpöpöjärjestelmän lämmönlähteen kokoa. Teoriaosuudessa käsiteltiin, kuinka maankamaran regeneroituu luonnollisesti, kun sieltä otetaan lämpöä sekä sitä, kuinka regenerointia voidaan tehostaa keinotekoisesti lataamalla maankamaraan lämpöä eri lämmönlähteistä. Lisäksi teoriaosuudessa esiteltiin auringosta ja ulkoilmasta saatavaan lämpöenergiaan vaikuttavia tekijöitä. Auringosta saatavan lämpöenergian määrään vaikuttavat muun muassa aurinkokeräimien hyötysuhde, maantieteellinen sijainti, aurinkokeräimien kallistus ja suuntaus ilman suuntien mukaan sekä ympäristön olosuhteet, kuten ulkoilman lämpötila. Ulkoilmasta saatavan lämpöenergian määrään vaikuttavat keräintyyppi, maantieteellinen sijainti ja ympäristön olosuhteet, kuten ulkoilman lämpötila ja sen kosteus.

Tutkimuksen tuloksena saatiin, että ilmalämpöpöjärjestelmän käyttö maalämpöpöjärjestelmän lisälämmönlähteenä on taloudellisesti kannattavaa tutkimuskohteena olleen toimistorakennuksen tapauksessa 15 vuoden tarkasteluajanjaksolla. Tutkimuskohteena olleen asuinkerrostalon tapauksessa ilmalämpöpöjärjestelmälle ei löytynyt taloudellista kannattavuutta. Aurinkolämpöpöjärjestelmät, tasokeräin- ja tyhjiökeräinjärjestelmät, eivät olleet kannattavia kummaankaan tarkastellun rakennuksen tapauksessa. Aurinkolämpöpöjärjestelmien suuret investointikustannukset tekivät niistä kannattamattomia. Ilmalämpöpöjärjestelmistä kannattavin oli vaihtoehto, missä ilmajäähdytin oli kytketty ohjaamaan sen tuottama lämpöenergia maalämpöpumpun höyrystimelle menevään lämmönsiirtonesteeseen. Ilmajäähdyttimen lämpöteho oli 32,7 kW, kun ulkoilman lämpötila on + 15 °C, suhteellinen kosteus 50 %, lämmönsiirtonesteen lämpötila 0 °C ja sen tilavuusvirta 4 L/s. Tämän järjestelmän laskennallinen takaisinmaksuaika on 0 % energiahinnan eskalaatiolla 10,4 vuotta, 1 % eskalaatiolla 10,2 vuotta ja 3 % eskalaatiolla 9,7 vuotta. Saavutettu säästö 15 vuoden tarkasteluajanjaksolla oli vastaavilla energianhintojen eskalaatioilla 18 373, 21 872 ja 30 170 euroa. Lisälämmönlähteiden kytkennöillä ei ollut laskennallisesti suurta eroa maalämpöpöjärjestelmän sähkön kulutukseen. Lisälämmönlähteen lämpöenergian johtaminen lämmönsiirtonesteeseen ennen maalämpöpumpun höyrystintä (kytkentä 1) oli kuitenkin hieman parempi kytkentävaihtoehto kuin lämpöenergian johtaminen energiakaivokenttään menevään lämmönsiirtonesteeseen (kytkentä 2) kaikissa tarkastelluissa järjestelmissä ja vaihtoehtoissa. Esimerkiksi laskennassa saatiin ilmalämpöpöjärjestelmän vaihtoehto 2 kohdalla kytkennällä 2 energiahinnan eskalaatiolla 0 % euromääräinen säästö oli noin 430 euroa suurempi kuin kytkennällä 1. Yhteenvetona laskennan tuloksista voidaan todeta, että ilmalämpöpöjärjestelmien käyttäminen maalämpöpöjärjes-

telmän lisälämmönlähteenä näyttäisi olevan kannattavampaa kuin aurinkolämpöjärjestelmien käyttäminen. Tämä johtuu pitkälti siitä, että ilmalämpöjärjestelmien investointikustannukset ovat huomattavasti pienemmät kuin aurinkolämpöjärjestelmien. Toisaalta aurinkolämpöjärjestelmien kannattavuutta saattaisi parantaa tuotetun lämpöenergian suora hyödyntäminen rakennuksen lämmityksessä ja lämpimän käyttöveden tuottamisessa, mikä oli rajattu tämän diplomityön tutkimuksen ulkopuolelle. Tutkimuksessa ei havaittu suurta eroa lämmönlähteiden käyttökustannuksissa.

Jatkotutkimuskohteena voitaisiin tutkia, kuinka paljon suunnitellun energiakaivokentän kokoa voitaisiin pienentää lisäämällä maalämpöjärjestelmään lisälämmönlähde heikentämättä kuitenkaan järjestelmän toimintavarmuutta, ja sen taloudellisia vaikutuksia lämmitysjärjestelmän elinkaarikustannuksiin. Mitoitettua pienemmän energiakaivokentän keruupiirin liuoslämpötilat laskevat nopeammin. Toisaalta lisälämmönlähteen regenerointituotto kasvaa, koska liuoslämpötilan ja kerättävän lämmönlähteen lämpötilaero kasvaa, joka tehostaa lämmönsiirtoa. Maalämpöjärjestelmän investointikustannuksista energiakaivokenttä on suurin yksittäinen investointikustannus. Energiakaivokentän kokonaismetrimäärän vähentämisellä voidaan pienentää merkittävästi järjestelmän investointikustannuksia. Tämä saattaa edistää maalämpöjärjestelmän valintaa päätettäessä rakennuksen lämmitysjärjestelmästä. Lisäksi jatkotutkimuskohteena voitaisiin tarkastella aurinkosähköä hyödyntävien lämpöpumppujen käyttämistä energiakaivokentän regeneroimiseen. Lämpöpumppuina voisivat toimia esimerkiksi ilma-vesilämpöpumput. Lämpöpumppujen regenerointiteho olisi moninkertainen tässä työssä käytettyihin regenerointilähteisiin verrattuna. Toisaalta järjestelmän investointikustannukset olisivat todennäköisesti huomattavasti suuremmat. Käyttämällä lämpöpumppujen sähkön lähteenä aurinkosähköä, ei järjestelmän sähkön kulutus juurikaan kasva. Aurinkopaneelien asentaminen kylläkin lisää entisestään investointikustannuksia. Tässäkin tapauksessa tärkeintä olisi tutkia lämpöpumppujen taloudellista kannattavuutta siitä näkökulmasta, että kuinka paljon energiakaivokentän kokonaismetrimäärää voidaan lämpöpumppujen avulla vähentää heikentämättä maalämpöjärjestelmän toimintavarmuutta.



## Lähdeluettelo

- [1] Tilastokeskus. Suomen virallinen tilasto (SVT): Asumisen energiankulutus. Liitetaulukko 2. Asumisen energiankulutus energialähteittäin vuonna 2016, GWh. [verkkoaineisto] ISSN 2323-3273. 2016. [viitattu 24.1.2018] Saatavissa: [http://www.stat.fi/til/asen\\_/2016/asen\\_2016\\_2017-11-17\\_tau\\_002\\_fi.html](http://www.stat.fi/til/asen_/2016/asen_2016_2017-11-17_tau_002_fi.html).
- [2] Seppänen O. Rakennusten lämmitys. 2. painos. Jyväskylä: Suomen LVI-liitto ry, 2001. ISBN 951-98811-0-7.
- [3] Kersalo, J. & Pirinen, P. Suomen maakuntien ilmasto. Helsinki: Ilmatieteen laitos, 2009. ISBN 978-951-697-711-9.
- [4] Pirinen, P., Simola, H., Aalto, J., Kaukoranta, J-P., Karlsson, P. & Ruuhela, R. Tilastoja Suomen ilmastosta 1981-2010. Helsinki: Ilmatieteen laitos, 2012. ISBN 978-951-697-766-2.
- [5] Sandberg E. Sisäilmasto ja ilmastointijärjestelmät. 2. painos. Forssa: Talotekniikka-Julkaisut Oy, 2016. ISBN 978-952-99770-8-6.
- [7] N. Leppäharju. Kalliolämmön hyödyntäminen vaikuttavat geofysikaaliset ja geologiset tekijät. Pro gradu -tutkielma. Oulun yliopisto, Fysikaalisten tieteiden laitos. Oulu. 2008.
- [8] Drebs, A., Nordlund, A., Karlsson, P., Helminen, J. & Rissanen, P. Tilastoja Suomen ilmastosta 1971-2000. Helsinki: Ilmatieteen laitos, 2002. ISBN 951-69756-8-2.
- [9] Ritola J. Lämmön varastointi kallioon porareikäputkistolla. Espoo: VTT, 1988. ISBN 951-38-3096-9.
- [10] Haenel, R., Stegena, L. & Rybach, L. Handbook of Terrestrial Heat-Flow Density Determination. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1988.
- [11] Kukkonen I. & Peltoniemi S. Relationships between Thermal and other Petrophysical Properties of Rocks in Finland. Physics and Chemistry of the Earth. Vol. 23:3. 1998. S. 341-349. [Viitattu 28.12.2018]. Saatavissa: DOI: 10.1016/S0079-1946(98)00035-4
- [12] Bertram E. Heat pump systems with vertical ground heat exchanger and uncovered solar thermal collectors: solar ground regeneration - dynamic simulation, measurement and dimensioning. Dortmund: Monsenstein und Vannerdat, 2015. ISBN 978-3-95645-481-3.
- [13] McCorry, M., Jones, G.LI. (toimittanut). Geotrained training manual for designers of shallow geothermal systems. Bryssel: Geotrained, European Federation of Geologists, 2011. ISBN 978-2-9601071-0-4.

- [14] Geologian tutkimuskeskus. Pohjaveden synty ja esiintyminen [verkkoaineisto]. [viitattu 13.03.2018]. Saatavissa: [http://weppi.gtk.fi/aineistot/mp-opas/pohjav\\_esiintyminen.htm](http://weppi.gtk.fi/aineistot/mp-opas/pohjav_esiintyminen.htm).
- [15] G. Hellström. Thermal performance of borehole heat exchangers. Lund: Department of Mathematical Physics, Lund Institute of Technology. 1998.
- [16] Solar district heating. Solar district heating guidelines [verkkoaineisto]. [viitattu 14.3.2018]. Saatavissa: [http://solar-district-heating.eu/Portals/0/SDHp2m/SDH-Guidelines\\_update\\_09.2017.pdf](http://solar-district-heating.eu/Portals/0/SDHp2m/SDH-Guidelines_update_09.2017.pdf).
- [17] Rees SJ. 1 - An introduction to ground-source heat pump technology. Teoksessa: Rees SJ, (toim.) Advances in Ground-Source Heat Pump Systems. Leeds: Woodhead Publishing, 2016. S. 1-25. ISBN 978-0-08-100311-4.
- [18] Aittomäki A. Kylmäteknikka. 4. painos Porvoo: Suomen Kylmähdistys ry, 2012. ISBN 978-951-96449-7-4.
- [19] Sliwa T. & Rosen M. A. Natural and Artificial Methods for Regeneration of Heat Resources for Borehole Heat Exchangers to Enhance the Sustainability of Underground Thermal Storages: A Review. Sustainability. [Verkkolehti]. Vol. 7:10. 2015. S. 13104-13125. [Viitattu 23.3.2018]. DOI: 10.3390/su71013104.
- [20] You, T., Wu, W., Shi, W., Wang, B. & Li, X. An overview of the problems and solutions of soil thermal imbalance of ground-coupled heat pumps in cold regions. Applied Energy. [Verkkolehti]. Vol. 177. 2016. S. 515-536. [Viitattu 16.3.2018]. DOI: <https://doi-org.libproxy.aalto.fi/10.1016/j.apenergy.2016.05.115>.
- [21] Guo, M., Diao, N., Zhu, K. & Fang, Z. Optimization of Ground Heat Exchangers in Area with Imbalanced Heating and Cooling Load. Procedia Engineering. [Verkkolehti]. Vol. 205. 2017. S. 3727-3734. [Viitattu 19.3.2018]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.311>.
- [22] Beck, M., Bayer, P., de Paly, M., Hecht-Méndez, J. & Zell, A. Geometric arrangement and operation mode adjustment in low-enthalpy geothermal borehole fields for heating. Energy. [Verkkolehti]. Vol. 49. 2013. S. 434-443. [Viitattu 23.3.2018]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.10.060>.
- [23] Ericsson, L. O. Värmeutbyte mellan berggrund och borrhål vid bergvärmesystem. Väitöskirja. Geologiska Institutionen, Chalmers Tekniska Högskola och Göteborgs Universitet. Göteborg.
- [24] Eskilson, P. Thermal analysis of heat extraction boreholes. Väitöskirja. Lund Institute of Technology, Dep. of Mathematical Physics. Lund. 1987. [Viitattu 2.3.2018]. ISBN91-7900-298-6. Saatavissa: <http://www.buildingphysics.com/Eskilson1987.pdf>.

- [25] You, T., Shi, W., Wang, B., Wu, W. & Li, X. A new ground-coupled heat pump system integrated with a multi-mode air-source heat compensator to eliminate thermal imbalance in cold regions. *Energy and Buildings*. [Verkkolehti]. Vol. 107. 2015. S. 103-112. [Viitattu 20.2.2018]. DOI: <https://doi-org.libproxy.aalto.fi/10.1016/j.enbuild.2015.08.006>.
- [26] Zhu N, Wang J, Liu L. Performance evaluation before and after solar seasonal storage coupled with ground source heat pump. *Energy Conversion and Management*. [Verkkolehti]. Vol. 103. 2015. S. 924-933. [Viitattu 1.2.2018]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.07.037>.
- [27] Reda F. Long term performance of different SAGSHP solutions for residential energy supply in Finland. *Applied Energy*. [Verkkolehti]. Vol. 144. 2015. S. 31-50 [Viitattu 28.1.2018] DOI: <https://doi-org.libproxy.aalto.fi/10.1016/j.apenergy.2015.01.059>.
- [28] Duffie, J & Beckman, W. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 4. painos. Somerset: Wiley, 2013. ISBN 978-1-118-41812-3.
- [29] Tahkokorpi, M., Erat, B., Hänninen, P., Nyman, C., Rasinkoski, A. & Wiljander, M. *Aurinkoenergia Suomessa*. Riika: Into Kustannus Oy, 2016. ISBN 978-952-264-663-7.
- [30] Huld, T. & Pinedo, I. Global irradiation and solar electricity potential [Verkkoaineisto]. [Viitattu 30.01.2018]. Saatavissa: [http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_download/map\\_pdfs/G\\_opt\\_FI.pdf](http://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_download/map_pdfs/G_opt_FI.pdf).
- [31] Suman, S., Khan, M.K. & Pathak, M. Performance enhancement of solar collectors - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. [Verkkolehti]. Vol. 49. 2015. S. 192-210 [Viitattu 29.1.2018]. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.087>.
- [32] Kalogirou, S. A. *Solar energy engineering: processes and systems*. 2. painos. Boston: Academic Press, 2014. ISBN 978-0-12-397270-5.
- [33] Buildingphysics. EED - Earth Energy Designer. [verkkoaineisto]. [viitattu 18.06.2018]. Saatavissa: <https://buildingphysics.com/eed-2/>.
- [34] Grundfos. Mitoitus ja valinta - Grundfos product center. [verkkoaineisto]. [viitattu 19.06.2018]. Saatavissa: [https://product-selection.grundfos.com/frontpage.html?qcid=\\_375521490](https://product-selection.grundfos.com/frontpage.html?qcid=_375521490).
- [35] Siren, K. *Life-Cycle Calculation of building energy investments*. Espoo. Aalto-yliopisto. 2016.

## **Liiteluettelo**

Liite 1. Taso- ja tyhjiökeräinjärjestelmien painehäviöt. 6 sivua.

Liite 2. Ilmajäähdytinjärjestelmien painehäviöt. 1 sivu.

## Liite 1. Taso- ja tyhjiökeräinjärjestelmien painehäviöt

Taulukko 1 Toimistorakennuksen tasokeräinjärjestelmän eri pinta-alavaihtoehtojen painehäviölaskelmat.

### Toimistorakennus tasokeräin vaihtoehto 1

Mitat			Selite
Runko kauimmille keräinryhmille sisältäen nousun	27	m	
Runko reunimmaiselle	9	m	
Runko reunimmaiselle	9	m	
<b>Yhteensä</b>	<b>45</b>	<b>m</b>	
<b>Painehäviö</b>			<i>Arvioidaan 50 Pa/m</i>
Painehäviö runkoputkista	1800	Pa	<i>Pisin putkilenkki (27 m + 9 m)</i>
Painehäviö sarjaan kytketystä 10 keräimestä	7400	Pa	
Painehäviö keräimestä	4500	Pa	
Painehäviö mutkista	685	Pa	<i>5 % putkista ja keräimistä</i>
Painehäviö lämmönvaihtimesta (maks 33 kW)	44000	Pa	<i>Erään toimittajan mitoitusohjelmalla</i>
<b>Yhteensä</b>	<b>58385</b>	<b>Pa</b>	
Pumppausteho	0,13	kW	<i>MAGNA3 40-80 F</i>

### Toimistorakennus tasokeräin vaihtoehto 2

Mitat			
Runko kauimmille keräinryhmille sisältäen nousun	27	m	
Runko reunimmaiselle	16	m	
Runko reunimmaiselle	16	m	
<b>Yhteensä</b>	<b>59</b>	<b>m</b>	
<b>Painehäviö</b>			<i>Arvioidaan 50 Pa/m</i>
Painehäviö runkoputkista	2150	Pa	<i>Pisin putkilenkki (27 m + 16 m)</i>
Painehäviö sarjaan kytketystä 10 keräimestä	7400	Pa	
Painehäviö keräimestä	4500	Pa	
Painehäviö mutkista	702,5	Pa	<i>5 % putkista ja keräimistä</i>
Painehäviö lämmönvaihtimesta (maks 65 kW)	44000	Pa	<i>Erään toimittajan mitoitusohjelmalla</i>
<b>Yhteensä</b>	<b>58752,5</b>	<b>Pa</b>	
Pumppausteho	0,17	kW	<i>MAGNA3 40-80 F</i>

### Toimistorakennus tasokeräin vaihtoehto 3

Mitat			
Runko kauimmille keräinryhmille sisältäen nousun	51	m	
Runko reunimmaiselle	16	m	
Runko reunimmaiselle	16	m	
<b>Yhteensä</b>	<b>83</b>	<b>m</b>	
<b>Painehäviö</b>			<i>Arvioidaan 50 Pa/m</i>
Painehäviö runkoputkista	3350	Pa	<i>Pisin putkilenkki (51 m + 16 m)</i>
Painehäviö sarjaan kytketystä 10 keräimestä	7400	Pa	
Painehäviö keräimestä	4500	Pa	
Painehäviö mutkista	762,5	Pa	<i>5 % putkista ja keräimistä</i>
Painehäviö lämmönvaihtimesta (maks 96kW)	44000	Pa	<i>Erään toimittajan mitoitusohjelmalla</i>
<b>Yhteensä</b>	<b>60013</b>	<b>Pa</b>	
Pumppausteho	0,21	kW	<i>MAGNA3 40-80 F</i>

*Taulukko 2 Toimistorakennuksen tyhjiökeräinjärjestelmän eri pinta-alavaihtoehtojen painehäviölaskelmat.*

**Toimistorakennus tyhjiökeräin vaihtoehto 1**

<b>Mitat</b>			<b>Selite</b>
Runko kauimmille keräinryhmille sisältäen nousu	27	m	
Runko reunimmaiselle	16	m	
Runko reunimmaiselle	16	m	
	59	m	
<b>Painehäviö</b>			<i>Arvioidaan 50 Pa/m</i>
Painehäviö runkoputkista	2150	Pa	<i>Pisin putkilenkki (27 m + 16 m)</i>
Painehäviö sarjaan kytketystä 10 keräimestä	7400	Pa	
Painehäviö mutkista	477,5	Pa	<i>5 % putkista ja keräimistä</i>
Painehäviö lämmönvaihtimesta (maks 33 kW)	44000	Pa	<i>Erään toimittajan mitoitusohjelmalla</i>
<b>Yhteensä</b>	54027,5	Pa	
Pumppausteho	0,12	kW	MAGNA3 40-80 F

**Toimistorakennus tyhjiökeräin vaihtoehto 2**

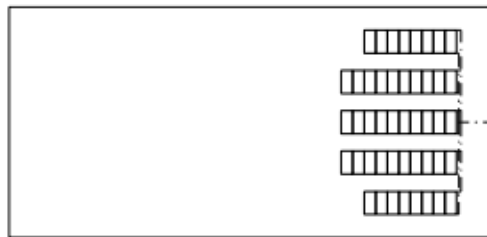
<b>Mitat</b>			
Runko kauimmille keräinryhmille sisältäen nousu	51	m	
Runko reunimmaiselle	16	m	
Runko reunimmaiselle	16	m	
<b>Yhteensä</b>	83	m	
<b>Painehäviö</b>			<i>Arvioidaan 50 Pa/m</i>
Painehäviö runkoputkista	3350	Pa	<i>Pisin putkilenkki (51 m + 16 m)</i>
Painehäviö sarjaan kytketystä 10 keräimestä	7400	Pa	
Painehäviö mutkista	537,5	Pa	<i>5 % putkista ja keräimistä</i>
Painehäviö lämmönvaihtimesta (maks 65 kW)	44000	Pa	<i>Erään toimittajan mitoitusohjelmalla</i>
<b>Yhteensä</b>	55287,5	Pa	
Pumppausteho	0,16	kW	MAGNA3 40-80 F

**Toimistorakennus tyhjiökeräin vaihtoehto 3**

<b>Mitat</b>			
Runko kauimmille keräinryhmille sisältäen nousu	75	m	
Runko reunimmaiselle	16	m	
Runko reunimmaiselle	16	m	
<b>Yhteensä</b>	16	m	
	123	m	
<b>Painehäviö</b>			<i>Arvioidaan 50 Pa/m</i>
Painehäviö runkoputkista	4550	Pa	<i>Pisin putkilenkki (75 m + 16 m)</i>
Painehäviö sarjaan kytketystä 10 keräimestä	7400	Pa	
Painehäviö mutkista	597,5	Pa	<i>5 % putkista ja keräimistä</i>
Painehäviö lämmönvaihtimesta (maks 96kW)	44000	Pa	<i>Erään toimittajan mitoitusohjelmalla</i>
<b>Yhteensä</b>	56547,5	Pa	
Pumppausteho	0,20	kW	MAGNA3 40-80 F

# TOIMISTORAKENNUS

## TYHJIÖKERÄIMET

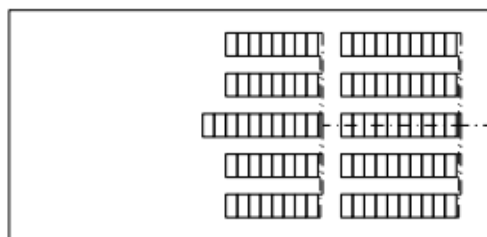


46 KPL

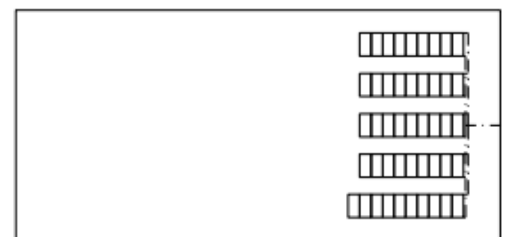
## TASOKERÄIMET



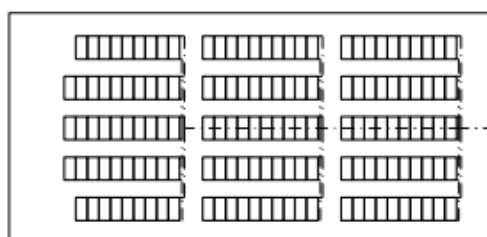
23 KPL



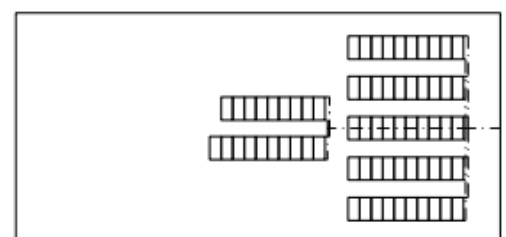
92 KPL



46 KPL



138 KPL



69 KPL

*Kuva 1 Havainnekuvat toimistorakennuksen aurinkokeräinjärjestelmien ryhmittelystä rakennuksen katolla.*

*Taulukko 3 Asuinkerrostalon tasokeräinjärjestelmän eri pinta-alavaihtoehtojen painehäviölaskelmat.*

**Asuinkerrostalon tasokeräin vaihtoehto 1**

Mitat			Selite
Runko kauimmille keräinryhmille sisältäen nou:	27	m	
Runko reunimmaiselle	9	m	
Runko reunimmaiselle	9	m	
<b>Yhteensä</b>	<b>45</b>	<b>m</b>	
<b>Painehäviö</b>			<i>Arvioidaan 50 Pa/m</i>
Painehäviö runkoputkista	1800	Pa	<i>Pisin putkilenkki (27 m + 9 m)</i>
Painehäviö sarjaan kytketystä 10 keräimestä	7400	Pa	
Painehäviö keräimestä	4500	Pa	
Painehäviö mutkista	685	Pa	<i>5 % putkista ja keräimistä</i>
Painehäviö lämmönvaihtimesta (maks 33 kW)	44000	Pa	<i>Erään toimittajan mitoitusohjelmalla</i>
<b>Yhteensä</b>	<b>58385</b>	<b>Pa</b>	
Pumppausteho	0,14	kW	<i>MAGNA3 40-80 F</i>

**Asuinkerrostalon tasokeräin vaihtoehto 2**

<b>Mitat</b>			
Runko kauimmille keräinryhmille sisältäen nou:	51	m	
Runko reunimmaiselle	9	m	
Runko reunimmaiselle	5,5	m	
<b>Yhteensä</b>	<b>65,5</b>	<b>m</b>	
<b>Painehäviö</b>			<i>Arvioidaan 50 Pa/m</i>
Painehäviö runkoputkista	2825	Pa	<i>Pisin putkilenkki (27 m + 16 m)</i>
Painehäviö sarjaan kytketystä 10 keräimestä	7400	Pa	
Painehäviö keräimestä	4500	Pa	
Painehäviö mutkista	736,25	Pa	<i>5 % putkista ja keräimistä</i>
Painehäviö lämmönvaihtimesta (maks 65 kW)	44000	Pa	<i>Erään toimittajan mitoitusohjelmalla</i>
<b>Yhteensä</b>	<b>59461,25</b>	<b>Pa</b>	
Pumppausteho	0,18	kW	<i>MAGNA3 40-80 F</i>

**Asuinkerrostalon tasokeräin vaihtoehto 3**

<b>Mitat</b>			
Runko kauimmille keräinryhmille sisältäen nou:	75	m	
Runko reunimmaiselle	9	m	
Runko reunimmaiselle	9	m	
Runko reunimmaiselle	5,5	m	
<b>Yhteensä</b>	<b>98,5</b>	<b>m</b>	
<b>Painehäviö</b>			<i>Arvioidaan 50 Pa/m</i>
Painehäviö runkoputkista	4025	Pa	<i>Pisin putkilenkki (51 m + 16 m)</i>
Painehäviö sarjaan kytketystä 10 keräimestä	7400	Pa	
Painehäviö keräimestä	4500	Pa	
Painehäviö mutkista	796,25	Pa	<i>5 % putkista ja keräimistä</i>
Painehäviö lämmönvaihtimesta (maks 96kW)	44000	Pa	<i>Erään toimittajan mitoitusohjelmalla</i>
<b>Yhteensä</b>	<b>60721,25</b>	<b>Pa</b>	
Pumppausteho	0,23	kW	<i>MAGNA3 40-80 F</i>



*Taulukko 4 Asuinkerrostalon tyhjiökeräinjärjestelmän eri pinta-alavaihtoehtojen painehäviölaskelmat.*

**Asuinkerrostalon tyhjiökeräin vaihtoehto 1**

Mitat			Selite
Runko kauimmille keräinryhmille sisältäen nousu	51	m	
Runko reunimmaiselle	9	m	
Runko reunimmaiselle	5,5	m	
	65,5	m	
<b>Painehäviö</b>			<i>Arvioidaan 50 Pa/m</i>
Painehäviö runkoputkista	2825	Pa	<i>Pisin putkilenkki (51 m + 5,5 m)</i>
Painehäviö sarjaan kytketystä 10 keräimestä	7400	Pa	
Painehäviö mutkista	511,25	Pa	<i>5 % putkista ja keräimistä</i>
Painehäviö lämmönvaihtimesta (maks 33 kW)	44000	Pa	<i>Erään toimittajan mitoitusohjelmalla</i>
<b>Yhteensä</b>	54736,25	Pa	
Pumppausteho	0,13	kW	<i>MAGNA3 40-80 F</i>

**Asuinkerrostalon tyhjiökeräin vaihtoehto 2**

<b>Mitat</b>			
Runko kauimmille keräinryhmille sisältäen nousu	51	m	
Runko reunimmaiselle	9	m	
Runko reunimmaiselle	5,5	m	
<b>Yhteensä</b>	65,5	m	
<b>Yhteensä kaksi kattoa</b>	131	m	
<b>Painehäviö</b>			<i>Arvioidaan 50 Pa/m</i>
Painehäviö runkoputkista	2825	Pa	<i>Pisin putkilenkki (51 m + 5,5 m)</i>
Painehäviö sarjaan kytketystä 10 keräimestä	7400	Pa	
Painehäviö mutkista	511,25	Pa	<i>5 % putkista ja keräimistä</i>
Painehäviö lämmönvaihtimesta (maks 65 kW)	44000	Pa	<i>Erään toimittajan mitoitusohjelmalla</i>
<b>Yhteensä</b>	54736,25	Pa	
Pumppausteho	0,25	kW	<i>2 kpl MAGNA3 40-80 F</i>

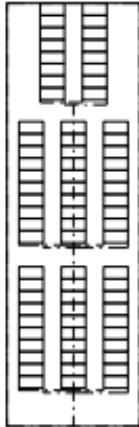
**Asuinkerrostalon tyhjiökeräin vaihtoehto 3**

<b>Mitat</b>			
Runko kauimmille keräinryhmille sisältäen nousu	75	m	
Runko reunimmaiselle	9	m	
Runko reunimmaiselle	9	m	
Runko reunimmaiselle	5,5	m	
<b>Yhteensä</b>	98,5	m	
<b>Yhteensä kaksi kattoa</b>	197	m	
<b>Painehäviö</b>			<i>Arvioidaan 50 Pa/m</i>
Painehäviö runkoputkista	4025	Pa	<i>Pisin putkilenkki (75 m + 5,5 m)</i>
Painehäviö sarjaan kytketystä 10 keräimestä	7400	Pa	
Painehäviö mutkista	571,25	Pa	<i>5 % putkista ja keräimistä</i>
Painehäviö lämmönvaihtimesta (maks 96kW)	44000	Pa	<i>Erään toimittajan mitoitusohjelmalla</i>
<b>Yhteensä</b>	55996,25	Pa	
Pumppausteho	0,29	kW	<i>2 kpl MAGNA3 40-80 F</i>

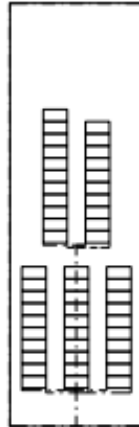
# ASUINKERROSTALO

## TYHJIÖKERÄIMET

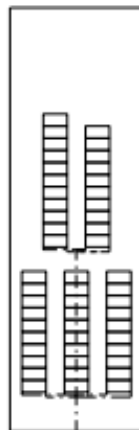
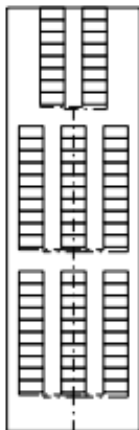
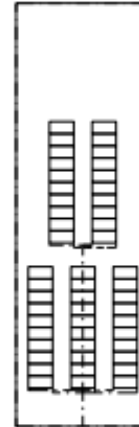
152 KPL



102 KPL

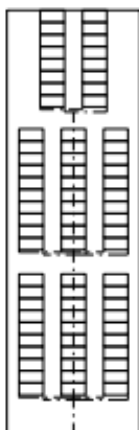


50 KPL

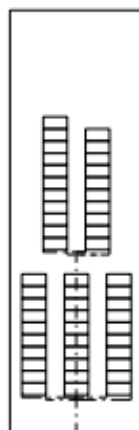


## TASOKERÄIMET

76 KPL



51 KPL



25 KPL



Kuva 2 Havainnekuvat asuinkerrostalon aurinkokeräinjärjestelmien ryhmittelystä rakennuksen katolla.

## Liite 2. Ilmajäähdynjärjestelmien painehäviöt

*Taulukko 5 Ilmajäähdyn vaihtoehtojen painehäviölaskelmat. Painehäviö saatiin laite-toimittajan mitoitusohjelmasta.*

Ilmajäähdyn			
	Vaihtoehto 1	Vaihtoehto 2	Vaihtoehto 3
Tilavuusvirta [L/s]	2	4	6
Painehäviö [kPa]	21	25	32
Pumppu	MAGNA1 40-60 F	MAGNA3 40-100 F	MAGNA3 50-150 F
Teho [kW]	0,082	0,211	0,336